

MOTOR STIRLING PISTON AIR

DENGAN MENGGUNAKAN PENDINGIN

TUGAS AKHIR
Diajukan untuk memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Jurusus Teknik Mesin



Disusun oleh :

TULISTIONO

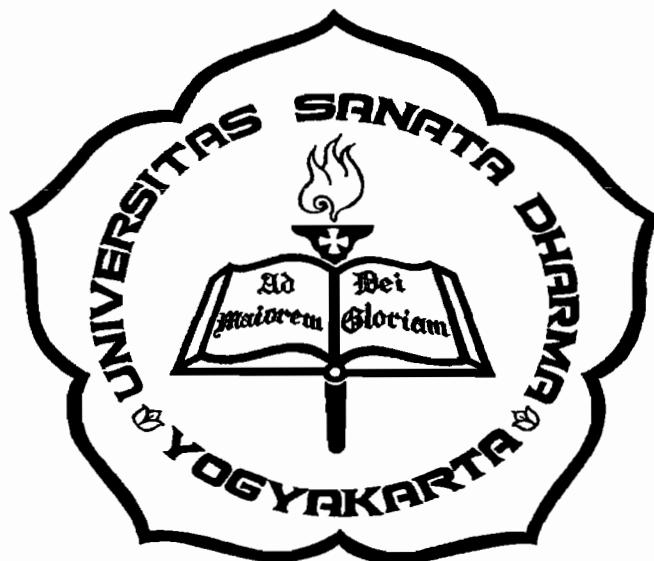
NIM : 98 5214 098

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SANATA DHARMA
YOGYAKARTA
2006**

WATER PISTON STIRLING ENGINE USING COOLER

FINAL PROJECT

**Presented as Partial Fulfillment of the Requirements
to Obtain the *Sarjana Teknik* Degree
in Mechanical Engineering**



By

TULISTIONO

Student Number: 98 5214 098

**MECHANICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
ENGINEERING FACULTY
SANATA DHARMA UNIVERSITY
YOGYAKARTA
2006**

TUGAS AKHIR
MOTOR STIRLING PISTON AIR
DENGAN MENGGUNAKAN PENDINGIN

Disusun oleh:

TULISTIONO

NIM: 98 5214 098

Telah disetujui oleh:

Pembimbing I



Ir. FA. Rusdi Sambada, M.T.

Tanggal.....

TUGAS AKHIR
MOTOR STIRLING PISTON AIR
DENGAN MENGGUNAKAN PENDINGIN

Dipersiapkan dan ditulis oleh :

TULISTIONO
NIM : 98 5214 098

Telah dipertahankan di depan panitia penguji
pada tanggal 01 Desember 2006
dan dinyatakan memenuhi syarat

Susunan Panitia Penguji

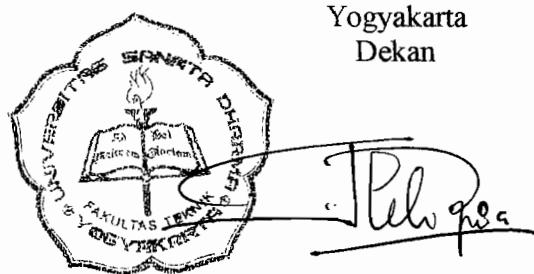
Ketua : Ir Yohanes Baptista Lukiyanto, M.T.

Sekretaris : Ir. Petrus Kanisius Purwadi, M.T.

Anggota : Ir. Fransiscus Asisi Rusdi Sambada, M.T.



Yogyakarta, Desember 2006
Fakultas Teknik
Universitas Sanata Dharma
Yogyakarta
Dekan



(Ir. Greg. Heliarko S.J.,S.S.,B.S.T.,M.A.,M.Sc.)

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tugas akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu Perguruan Tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 01 Desember 2006
Penulis

Tulistiono

M O T T O

- * Bila kamu ingin sukses jangan pernah tergantung pada orang lain, tapi lakukanlah dengan usahamu sendiri.
- * Pengharapan, doa, dan usaha adalah satu rangkaian menuju hidup yang lebih baik.
- * Barharaplah pada Bapa slalu, karena Ia tidak akan pernah meninggalkanmu dan Ia akan memberikan semua yang kamu harapkan bila waktunya tiba.
- * Percayalah semua akan indah tepat pada waktunya.
- * Hiduplah seperti air, mengalir dan terus mengalir hingga ketempat yang lebih baik.
- * Karena itu Aku berkata kepadamu: "apa saja yang kamu minta dan doakan, percayalah bahwa kamu telah menerimanya, maka hal itu akan diberikan kepadamu".

(Mrk 11 : 24)

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini kupersembahkan :

- * Tuhan Yesus Kristus dan Bunda Maria
- * Yang tercinta kedua Orang tua-ku
Terima kasih atas cinta kasih yang
selama ini senantiasa selalu menemani
- * Jeffry Winters yang telah memberikan
kesempatan untuk memperoleh gelar
Sarjana
- * Fitriatmi di Pekan Baru
terima kasih atas dukungan doa, cinta,
perhatian, kesetiaan, dan kebersamaan
selama ini

INTISARI

MOTOR STIRLING PISTON AIR DENGAN MENGGUNAKAN PENDINGIN

Oleh:

TULISTIONO

985214098

Motor *Stirling Piston Air* merupakan suatu alat pemompa air yang bergerak dengan menggunakan perbedaan temperature antara sisi pemanas dan sisi pendingin, dalam pembuatan Motor *Stirling Piston Air* ini panas yang digunakan menggunakan Solder yang mempunyai daya 300 watt dengan variasi Head Pompa dari 12 – 40 cm sehingga dapat diketahui karakteristik yang terjadi pada pompa.

Motor *Stirling Piston Air* ini menghasilkan *effisiensi* yang rendah jika dibandingkan dengan *effisiensi* motor listrik pada umumnya. Daya maksimum yang dihasilkan oleh alat ini sebesar 0,513 watt; sedangkan daya pemompaan maksimum yang terjadi sebesar 0,188 watt. *Effisiensi fluidyne* maksimum sebesar 0,171; sedangkan *effisiensi* pompa maksimum sebesar 4,020.

ABSTRACT

PISTON AIR MOTOR STIRLING USING THE COOLER

By:
TULISTIONO
985214098

Motor Stirling Piston Air is a water pump that is started using by temperature differences between the heater side and the coolerside. In the making of *Motor Stirling Piston Air*, the using of heater is use solder who has power 300 watt with the variation of head pump 12 – 40 cm so that it can show the reaction of pumpcharacteristic

This *Motor Stirling Piston Air* will produce the low *efficiency* if we consider with the *efficiency* of electric motor in generally. The maximum power that produce by *Motor Stirling Piston Air* is 0,513 watt; but the power of pump is 0,188 watt. The maximum *fluidyne efficiency* is 0,171; but the maximum of *pump efficiency* is 4,020.

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan rahmat dan melimpahkan kasih karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan tugas akhir ini.

Tugas akhir berjudul “ **MOTOR STIRLING PISTON AIR DENGAN MENGGUNAKAN PENDINGIN** ”, ditulis untuk memenuhi salah satu syarat guna mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin.

Penulis mengakui adanya banyak hambatan dalam dalam menyelesaikan penulisan tugas akhir ini, tetapi berkat dukungan dan dorongan dari berbagai pihak, akhirnya tugas akhir ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Tuhan Yesus Kristus atas segala berkat dan bimbingan-Nya selama penggerjaan tugas ini.
2. Ir. Greg Heliarko, S.J., S.S., B.S.T., M.A., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Sanata Dharma.
3. Yosef Agung Cahyanta, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin.
4. Ir. Fransiscus Asisi Rusdi Sambada M.T, selaku Dosen Pembimbing yang telah dengan sabar membimbing dan memberikan pengarahan dalam menyelesaikan laporan tugas akhir ini.

5. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Sanata Dharma yang telah mendidik dan memberikan berbagai Ilmu Pengetahuan yang sangat membantu penyelesaian tugas akhir ini.
6. Yang tercinta kedua Orang Tua penulis yang telah memberikan kesempatan untuk menuntut ilmu sampai ke bangku kuliah, yang telah mencerahkan doa dan dana, perhatian, cinta, dorongan dan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Jeffry Winters yang selama ini telah yang telah memberikan kesempatan untuk menuntut ilmu sampai ke bangku kuliah, yang telah mencerahkan doa dan dana, perhatian, cinta, dorongan dan semangat untuk menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Fitriatmi di Pekanbaru, terima kasih atas cinta, perhatian dan kasih sayang, sumbangana dana serta kebersamaan selama ini.
9. Sahabat-sahabat seperjuangan (**TOGETHER IN ONE BOTTLE'S**):
Baz (Eko Priatmoko ST), *Gondhes* (Cornelius Ari Budiharso ST),
Made Yogi Mulyadi ST, *Bagong* (Cahyo Yuliantoro ST), serta seluruh temen-temenku yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu, terima kasih atas semangat dan kebersamaan kita.
10. Mas Intan, Mas Martono, juga Mas Roni, terima kasih atas segala pinjaman alat dan bantuannya.
11. Semua pihak yang banyak membantu yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis

Daftar Isi

	Halaman
Halaman Judul	i
Halaman Persetujuan	iii
Halaman Pengesahan	iv
Halaman Keaslian Karya	v
Halaman Motto	vi
Halaman Persembahan	vii
Intisari	viii
Abstract	ix
Kata Pengantar	x
Daftar Isi	xii
Daftar Tabel	xv
Daftar Gambar	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Keuntungan dan Kelemahan <i>Stirling</i>	2
I.3. Batasan Masalah	3
I.4. Tujuan Penelitian	3
I.5. Dasar Teori	4
I.6. Jenis-jenis Motor <i>Stirling</i>	6
I.7. Deskripsi Alat	9
I.8. Cara Kerja Alat	10

BAB II	METODE PENELITIAN	13
II.1.	Skema Penelitian	13
II.2	Peralatan/ Model Penelitian	14
II.3.	Langkah Penelitian	14
II.4.	Pengolahan dan Analisa Data	15
II.5.	Rumus-rumus yang Dipakai	16
BAB III	ANALISISA DATA DAN PERHITUNGAN	23
III.1.	Data Percobaan	23
III.2.	Pengolahan dan Perhitungan Data	29
III.2.1.	Pengolahan Data Percobaan 1	29
III.2.1.1.	Perhitungan Tekanan Akhir (P_{akhir})	29
III.2.1.2.	Perhitungan Panjang <i>Displacer</i> (L_D)	29
III.2.1.3.	Perhitungan Kecepatan Sudut (ω)	30
III.2.1.4.	Perhitungan <i>frekuensi alami</i> (f)	30
III.2.1.5.	Perhitungan Daya <i>Output</i> pada motor	31
III.2.1.6.	Perhitungan Daya <i>Output</i> pada pompa	34
III.2.1.7.	Perhitungan <i>Viscous Losses</i> (R)	34
III.2.1.8.	Perhitungan <i>effisiensi fluidyne</i> ($\mu_{fluidyne}$) ...	35
III.2.1.9.	Perhitungan <i>effisiensi pompa</i> (μ_{pompa})	35
III.2.1.10.	Perhitungan <i>swept volume</i>	35
III.2.1.11.	Perhitungan <i>Beale Number</i>	36

BAB IV	PEMBAHASAN	.....	44
	IV.1. Pengaruh panjang displacer terhadap frekuensi alami ...	44	
	a. Pengaruh panjang displacer terhadap frekuensi alami	45	
	b. Pengaruh Daya Motor terhadap Daya pompa	46	
	c. Pengaruh Kecepatan sudut terhadap <i>Viscous Losses</i>	48	
	d. Pengaruh effisiensi fluidyne terhadap effisiensi pompa ...	49	
	e. Pengaruh frekuensi osilasi terhadap swept volume	50	
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN	.....	52
	V.1. Kesimpulan	.....	52
	V.2. Saran	.....	54
DAFTAR PUSTAKA		.....	56

Daftar Tabel

Tabel 3.1. Data Percobaan 1	23
Tabel 3.2. Data Percobaan 2	24
Tabel 3.3. Data Percobaan 3	24
Tabel 3.4. Data Percobaan 4	25
Tabel 3.5. Data Percobaan 5	25
Tabel 3.6. Data Percobaan 6	26
Tabel 3.7. Data Percobaan 7	26
Tabel 3.8. Data Percobaan 8	27
Tabel 3.9. Data Percobaan 9	27
Tabel 3.10. Data Percobaan 10	28
Tabel 3.11. Data Percobaan 11	28
Tabel 3.12. Data Perhitungan Percobaan 1	37
Tabel 3.13. Data Perhitungan Percobaan 2	37
Tabel 3.14. Data Perhitungan Percobaan 3	38
Tabel 3.15. Data Perhitungan Percobaan 4	38
Tabel 3.16. Data Perhitungan Percobaan 5	39
Tabel 3.17. Data Perhitungan Percobaan 6	39
Tabel 3.18. Data Perhitungan Percobaan 7	40
Tabel 3.19. Data Perhitungan Percobaan 8	40
Tabel 3.20. Data Perhitungan Percobaan 9	41
Tabel 3.21. Data Perhitungan Percobaan 10	41

Tabel 3.22. Data Perhitungan Percobaan 11	42
Tabel 3.23. Data Perhitungan rata-rata tiap-tiap Percobaan	43

Daftar Gambar

Gambar 1.1. Diagram P – V dan Diagram T – S	5
Gambar 1.2. Motor Stirling Type Alfa	7
Gambar 1.3. Motor Stirling Type Beta	8
Gambar 1.4. Motor Stirling Type Gamma	9
Gambar 1.5. Skema Stirling Piston Air	10
Gambar 1.6. Skema Dasar	11
Gambar 1.7. Tabung Output berisolasi	12
Gambar 2.1. Skema Penelitian	13
Gambar 2.2. Dua Pipa Tabung yang di gabung	18
Gambar 4.1. Grafik T sisi panas vs f Osilasi	44
Gambar 4.2. Grafik L_D teoritis vs f alami teoritis	45
Gambar 4.3. Grafik Daya Motor vs Daya Pompa	46
Gambar 4.4. Grafik Kecepatan Sudut vs Rugi-rugi Viskositas	48
Gambar 4.5. Grafik effisiensi fluidyne vs effisiensi pompa	49
Gambar 4.6. Grafik f Osilasi vs Osilasi sisi displacer	50
Gambar 4.7. Grafik Osilasi sisi displacer vs swept volume	50

BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang ada di Indonesia ini semakin lama semakin maju, penggunaan mesin-mesin dan peralatan yang canggih semakin banyak, entah itu di Industri maupun rumah tangga.

Dengan semakin banyaknya penggunaan mesin-mesin dan peralatan, maka kebutuhan energi yang diperlukan juga semakin besar, dan yang paling banyak adalah penggunaan BBM (Bahan Bakar Minyak). Padahal Sumber Daya Alam yang bisa diolah menjadi BBM semakin menipis dan polusi yang ditimbulkan dari penggunaan BBM ini semakin lama bertambah banyak.

Oleh karena itu, maka perlu adanya sumber energi alternatif sebagai penggantinya. Sumber energi alternatif yang dipilih haruslah murah, banyak tersedia dan ramah lingkungan. Ada banyak pilihan yang antara lain energi matahari, energi angin, energi panas bumi, energi ombak, dan yang paling banyak dimanfaatkan sekarang ini adalah energi matahari. Di Indonesia masih sedikit penggunaannya, padahal iklim yang dipunya cocok untuk penggunaan energi matahari sebagai energi alternatif.

Tujuan dari proyek ini adalah mendesign dan menerapkan suatu *Motor Stirling Piston Air* dengan pendingin untuk penggunaannya sebagai pompa air dengan menggunakan sumber energi panas dari energi matahari.

I.2. Keuntungan dan Kelemahan Stirling Piston Air

a. Keuntungan Stirling Piston Air :

- Panas eksternal dan pembakaran campuran udara dan bahan bakar lebih mudah diatur.
- Proses Pembakaran yang terus-menerus dapat digunakan untuk mensuplai panas sehingga emisi dari bahan bakar yang tidak terbakar dapat dieliminasi.
- *Stirling Piston Air* ini tidak memerlukan pelumas dan hanya membutuhkan pemeriksaan yang minimum.
- *Design Stirling Piston Air* sangat sederhana.

b. Kelemahan Stirling Piston Air :

- *Stirling Piston Air* tidak bisa dijalankan dengan segera, karena membutuhkan pemanasan terlebih dahulu.
- *Stirling Piston Air* menghasilkan daya keluaran lebih kecil jika dibandingkan dengan jenis motor yang mempunyai ukuran yang sama.
- *Stirling Piston Air*, terutama type tertentu dapat bekerja pada temperature yang kecil tetapi akan berhenti untuk jumlah daya yang dihasilkan dalam kaitan dengan pertukaran kalor.

I.3. Batasan Masalah

Secara keseluruhan, *Motor Stirling Piston Air* ini dibuat dengan bahan-bahan yang mudah didapatkan kemudian digunakan untuk memompa air dengan cara menghubungkan bagian *output* dengan pompa yang terbuat dari dua katup searah. Dalam penelitian ini, pemanas yang digunakan untuk memanaskan *heat exchanger* adalah solder dengan daya 300 watt dan dengan variasi *head* pompa atau ketinggian pompa sehingga bisa mengetahui debit air yang dihasilkan, dengan tujuan mengetahui pengaruh panas masukan, cara pendinginan, daya yang dihasilkan, dan efffisiensi sehingga bisa mengetahui debit air yang dihasilkan.

I.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang Motor *Stirling Piston Air* yang mampu untuk memompa air.
2. Untuk mengetahui karakteristik pompa air dengan menggunakan penggerak *Stirling Piston Air*.
3. Untuk menaikkan kesadaran masyarakat tentang energi alternatif yang murah.

I.5. Dasar Teori

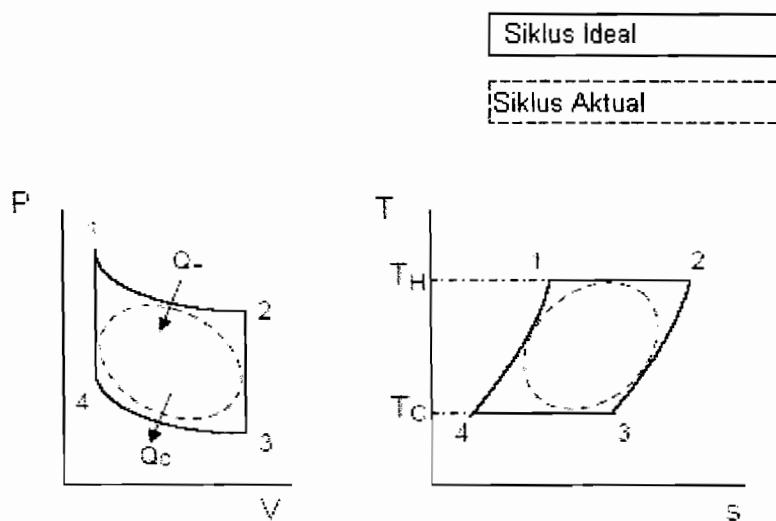
a. Prinsip Kerja *Stirling Piston Air* secara sederhana

Stirling Piston Air merupakan motor pembakaran eksternal yang diperbarui dengan siklus *Stirling*. Siklus *Stirling* tersusun atas proses pemanas dengan volume konstan, proses pengembangan *isothermal*, proses pendinginan dengan volume konstan, dan proses kompresi dengan volume konstan. Untuk *effisiensi* panas dari siklus ini yang dikeluarkan motor dengan pendingin bervolume konstan. Sedangkan untuk pemanas dengan volume konstan seimbang dengan *effisiensi* thermal siklus *Carnot* yang secara teoritis memiliki *effisiensi* panas tertinggi. Hal ini berarti bahwa siklus *Stirling* merupakan siklus yang dapat diperbaiki. Selanjutnya memungkinkan membuat mesin yang dapat dikendalikan dengan daya dari luar, bekerja sebagai mesin pendinginan. *Stirling Piston Air* pada umumnya memungkinkan udara bergerak diantara dua ruang yang memiliki perbedaan temperature dan membuat variasi tekanan terjadi. Dua ruang tersebut idealnya tertutup rapat dan tidak ada pertukaran udara dengan udara luar, karena *Stirling Piston Air* hanya dapat bekerja jika terdapat perbedaan temperature.

b. Siklus *Stirling*

Motor Stirling bekerja dengan pedoman memanaskan dan mendinginkan suatu gas secara berulang-ulang, yang mana biasanya gas yang digunakan adalah udara. Ketika gas dipanaskan di ruang tertutup, maka tekanannya akan naik dan mendorong piston untuk bergerak dan menghasilkan tenaga pukulan. Ketika gas didinginkan tekanannya akan turun dan piston hanya membutuhkan sedikit tenaga

untuk menampatkan gas kembali pada siklus berikutnya. Aliran gas akan mengalir secara siklus antar sisi panas dan sisi dingin. Siklus *Stirling* yang digunakan adalah Siklus thermodinamika yang melibatkan dua *Isothermal* dan dua *Isovolumen* (Volume konstan). Siklus *Stirling* yang ideal ditunjukkan pada Gambar 1.1 prosesnya adalah 1 ... 2 ... 3 ... 4 ... 1 ...



Gambar 1.1. Diagram $P - V$ dan Diagram $T - S$

1 – 2 : Proses Ekspansi Isotherm

Fluida kerja (dalam hal ini memakai udara) akan mengembang setelah di panaskan (Q_H), kemudian bergerak ke ruang *ekspansi* di mesin. Pada saat udara mengembang dan piston bekerja, maka menyebabkan volume mesin naik dan tekanannya berkurang. Dengan asumsi kondisi *Isothermal* ($T = T_C$). Kalor ditransfer ke fluida kerja ($Q_H = W_H$), dimana W_H adalah tenaga di piston.

2 – 3 : Proses Isovolumen Displacement (Cooling)

Fluida kerja di transfer sampai volume mesin maksimum dan konstan.

Kemudian kalor di transfer dari fluida kerja ke *Regenerator* yang menyebabkan tekanan, temperature, dan entropy gas akan berkurang.

3 – 4 : Proses Isothermal Compression

Fluida kerja yang di dinginkan di kompresi oleh piston di ruang kompresi dan panas (Q_C) bergerak ke *reservoir* yang suhunya lebih rendah pada temperature tetap (T_C). Dan sebagai konsekuensi, maka volume mesin akan berkurang, sedangkan tekanannya akan naik. Dengan asumsi kondisi *Isothermal* ($T = T_C$), kemudian panas ditransfer ke lingkungan sekitar ($Q_C = W_C$), dimana W_C adalah tenaga yang dihasilkan piston di fluida kerja.

4 – 1 : Proses Isovolumen Displacement (Heating)

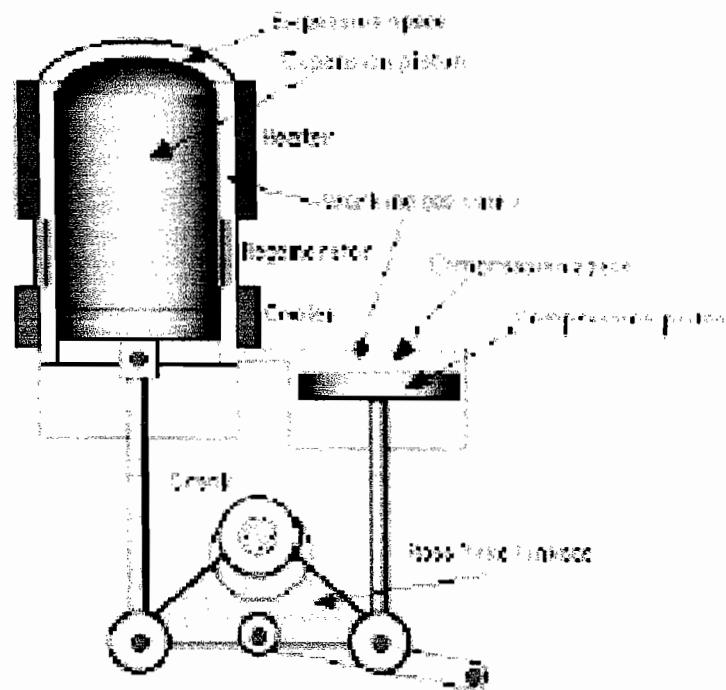
Fluida kerja bergerak ke *Regenerator* pada saat volume mesin pada posisi minimum dan konstan. Panas ditransfer dari *Regenerator* ke fluida kerja karena adanya pertambahan tekanan, temperature, dan entropy dari gas tersebut.

I.6. Jenis-jenis Motor Stirling

Motor Stirling dapat di bedakan menjadi tiga (3) berdasarkan *type*, yaitu *type Alfa*, *type Beta*, *type Gamma*. Masing-masing mempunyai keuntungan dan kerugian tersendiri.

I.6.1. Type Alfa

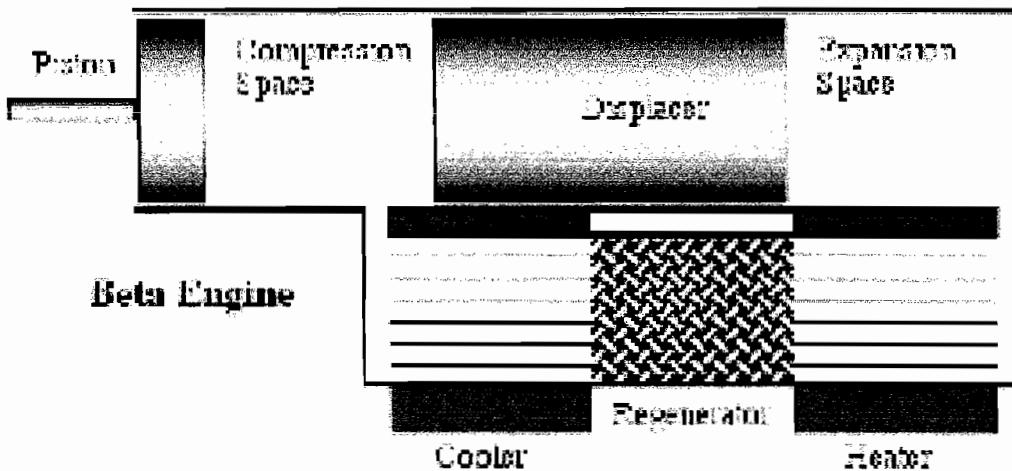
Type Alfa mempunyai dua (2) piston tenaga. Kerugian Type Alfa yang paling utama adalah tidak boleh ada kebocoran sedikitpun, oleh karena itu dalam pembuatannya, bagaian-bagaian sambungan harus diperhatikan dan diberi lapisan yang bisa mengatasi kebocoran, misalnya dengan menggunakan *sealer* atau *plastic stell*. Bentuk konstruksi dari dua (2) piston tersebut juga sulit.



Gambar 1.2. Motor Stirling Type Alfa

I.6.2. Type Beta

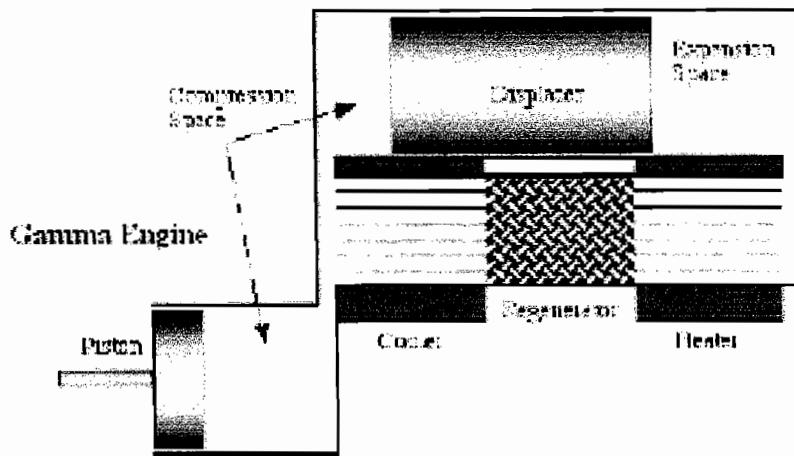
Type Beta mempunyai keuntungan dalam hal ukuran dan effisiensi. Yang menarik adalah karena antara *displacer* dan piston berada dalam satu sumbu, maka mekanisme batang dibuat dibuat harus teliti, jika sudah berjalan maka akan terlihat gerakan *displacer* dan piston yang menarik.



Gambar 1.3. Motor Stirling Type Beta

I.6.3. Type Gamma

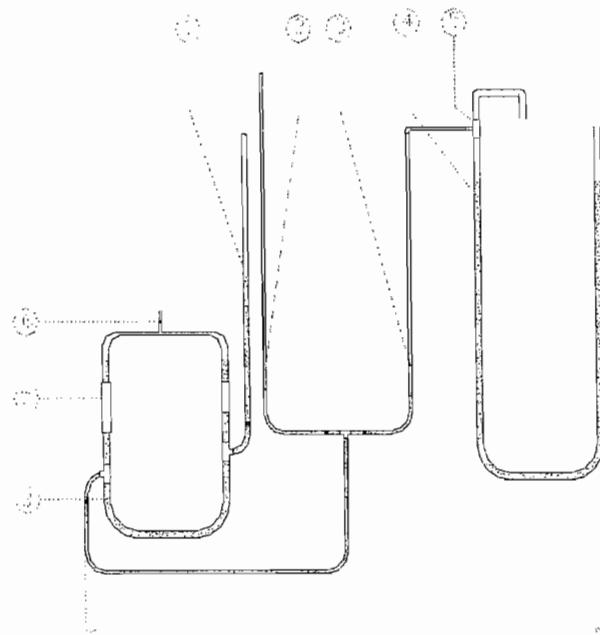
Type Gamma mempunyai dua (2) silinder pararel, satu untuk penempatan piston, dan satu lagi untuk penempatan *displacer*.



Gambar 1.4. Motor Stirling Type Gamma

I.7. Diskripsi Alat

Menggunakan *Stirling Engine* jenis piston air yang memiliki piston daya yang ditempatkan pada silinder yang terpisah sepanjang silinder piston *displacer* tetapi masih dihubungkan dengan bebas diantara keduanya dan masih menyisakan sebuah ruang. Konfigurasi seperti ini menghasilkan rasio kompresi yang rendah tetapi secara mekanis lebih sederhana.



Gambar 1.5. Skema Stirling Piston Air

Keterangan :

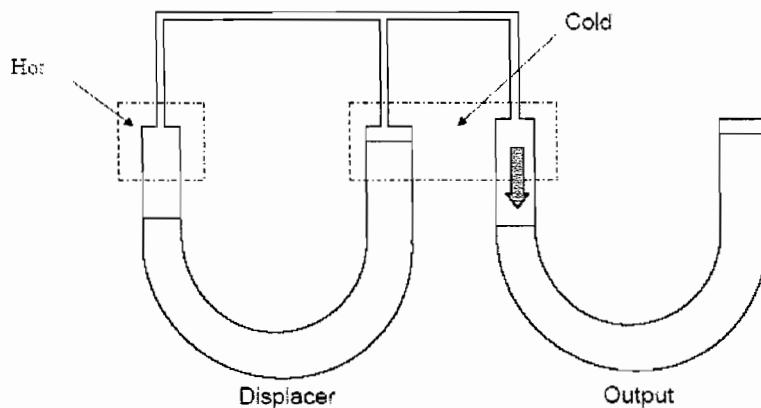
- | | |
|----------------------|--------------------------|
| 1. Pipa pengaturan | 5. Pompa |
| 2. Pipa tanpa beban | 6. Kran saluran udara |
| 3. Pipa dengan beban | 7. Heat Exchanger |
| 4. Reservoir | 8. Pipa <i>displacer</i> |

I.8. Cara Kerja Alat Secara Umum

Motor Stirling Piston Air ini beropersi dengan cara yang berbeda dengan mesin pada umumnya, karena piston mekaniknya digantikan dengan air. Oleh karena itu ketika sisi panas dipanaskan, maka tekanan udaranya akan bertambah, dan itu membuat posisi air pada sisi pendingin tabung akan naik, sedangkan posisi air pada sisi pemanas tabung akan turun. Tabung U dikiri sebagai *displacer* dan tabung U dikanan berfungsi sebagai *output* dan *output* ini

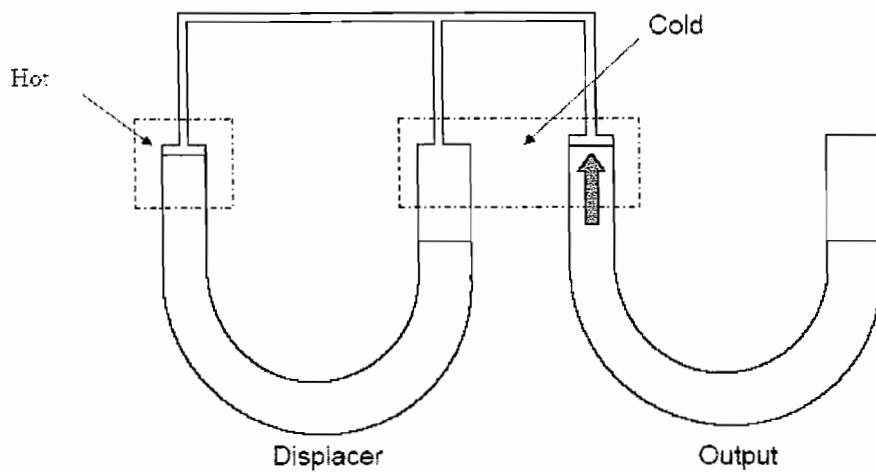
bisa difungsikan sebagai piston, seperti pada Gambar 1.6. Konstruksi ini termasuk dalam Motor *Stirling* dengan *type Gamma*.

Ketika air didalam tabung *displacer* bergoyang atau berosilasi dari satu sisi ke sisi yang lainnya dan kembali lagi, itu dikarenakan udara yang terdapat pada sisi panas di kiri tabung tekanannya akan naik karena dipanaskan, kemudian akan mendorong udara pada sisi kanan *displacer* yang berhubungan dengan tabung *output* sehingga pada air dalam tabung *output* akan ikut berisolasikan, seperti pada Gambar 1.6.



Gambar 1.6. Skema Dasar

Pada periode selanjutnya, air didalam *displacer* akan berisolasikan dan membuat air yang ada di tabung *output* akan berisolasikan juga, ini dikarenakan udara yang ada pada sisi pendingin tekanannya turun, seperti pada Gambar 1.7.



Gambar 1.7. Tabung Output berisolasi

Hal yang paling utama didalam mendesign Motor Stirling Piston Air

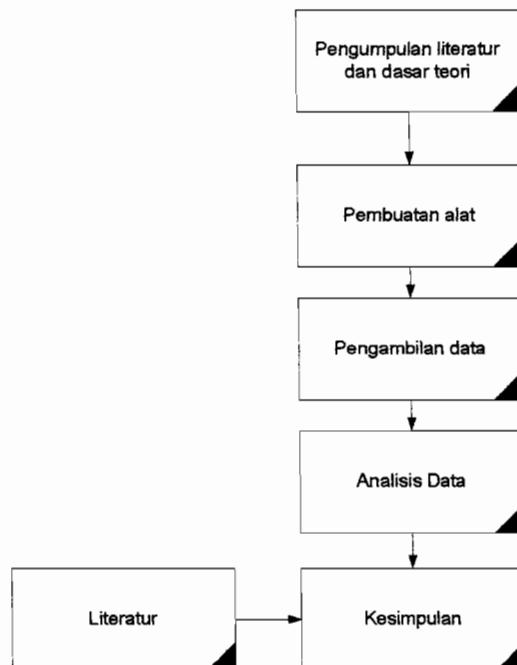
adalah kerugian panas yang terbuang dan kerugian *adiabatic* yang menyebabkan *effisiensi* yang rendah.

BAB II

METODE PENELITIAN

II. 1 Skema Penelitian

Untuk memudahkan proses pembuatan alat dan proses penelitian maka dibuat skema penelitian. Dalam proses penelitian meliputi proses pencarian data-data mengenai seluk-beluk tentang alat ini dari buku acuan dan internet. Proses selanjutnya adalah proses pembuatan alat dengan berbagai macam variasinya, dilanjutkan dengan proses pengujian kemudian dilakukan analisis data dan kesimpulan.



Gambar 2.1. Skema Penelitian

II.2. Peralatan / Model Penelitian

Melihat adanya permasalahan pada motor pembakaran internal dibuat suatu permodelan *Stirling Engine* agar diketahui karakteristik dari motor tersebut melalui eksperimen.

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini adalah :

1. Solder

Tegangan : 220 watt

Daya : 300 Watt

2. Termokopel

3. Display termokopel

4. Stopwatch

5. Penggaris

6. Gelas ukur

II.3. Langkah Penelitian

- a. Parameter yang di variasikan dalam penelitian ini adalah :

1. Ketinggian head pompa yang dipakai

Dengan :

- Menaikkan ketinggian head pompa dari 12 - 40 cm
- Data diambil tiap 10 menit

2. Penutupan kran selang tanpa beban.

Dengan :

- Kran di selang tanpa beban posisinya ditutup $\frac{1}{2}$.
- Data diambil tiap 10 menit.

b. Pelaksanaan Penelitian

1. Persiapan pengambilan data

- Pengisian air dalam tabung selang sampai pada batas yang diinginkan.
- Pemasangan beberapa alat pengukur yaitu : alat pengukur temperatur pada heater, penggaris pada selang, gelas ukur untuk mengukur debit air.

2. Pengambilan data

Pertama-tama perlu dicatat temperatur awal dan tekanan awalnya (dalam penelitian ini menggunakan 1 atm). Kemudian Solder mulai dipanaskan dan ditunggu sampai terjadi proses osilasi pada displacer. Pengambilan data dilakukan jika osilasi yang terjadi sudah mampu untuk menjalankan pompa air yang terpasang pada outputnya. Kemudian setiap 10 menit diukur temperatur heat exchanger, frekuensi osilasi, Panjang osilasi displacer, panjang osilasi output dengan beban atau tanpa beban dan debit air yang terpompa. Pengukuran ini dilakukan setiap 10 menit sekali selama 60 menit atau 1 jam.

II.4. Pengolahan dan Analisa Data

Dalam proses penelitian ini dapat diketahui data-data sebagai berikut :

- a. Daya keluaran Solder (P_{in})
- b. Tinggi Pompa
- c. Kenaikan suhu tangki Pemanas
- d. Frekuensi Osilasi
- e. Panjang Osilasi
- f. Panjang Langkah dengan Beban
- g. Panjang Langkah tanpa Beban
- h. Debit Air yang dihasilkan

Dari pengukuran-pengukuran didapatkan :

$$\text{Panjang } displacer = 1,32 \text{ m}$$

$$\text{Diameter } displacer = 0,0254 \text{ m}$$

$$\text{Diameter pompa} = 0,0127 \text{ m}$$

II.5. Rumus-rumus yang Dipakai :

Tekanan Akhir dalam yang diukur masih dalam cm, maka Tekanan Akhir tersebut harus terlebih dahulu di konversi ke dalam Pa dengan rumus sbb :

$$P_{akhir} = \rho_{air} \times g \times P_{akhir} \text{ Pa} \quad \dots \dots \dots \quad (2.1)$$

dengan :

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

$$g = \text{percepatan Gravitasi (m/ s}^2\text{)}$$

$$P_{akhir} = \text{Tekanan akhir (m)}$$

Panjang pipa *Displacer* secara teoritis dapat dihitung dengan :

$$L_D = \frac{g}{2\pi^2 f^2} \text{ cm} \quad \dots \dots \dots \quad (2.2)$$

dengan :

g = Percepatan gravitasi (m/ s²)

f = Frekuensi Osilasi (Hz)

Panjang *displacer* secara teoritis ini digunakan untuk mengetahui perbedaan antara panjang *displacer* terukur dengan panjang *displacer* secara teoritis, karena panjang *displacer* ini mempengaruhi frekuensi alami yang terjadi.

Sedangkan Kecepatan Sudut dapat dihitung dengan persamaan :

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_D}} \text{ rad/s} \quad \dots \dots \dots \quad (2.3)$$

atau

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_D}} \text{ Hz} \quad \dots \dots \dots \quad (2.4)$$

$$\text{sehingga} \quad \omega = 2\pi f \quad \dots \dots \dots \quad (2.5)$$

dengan:

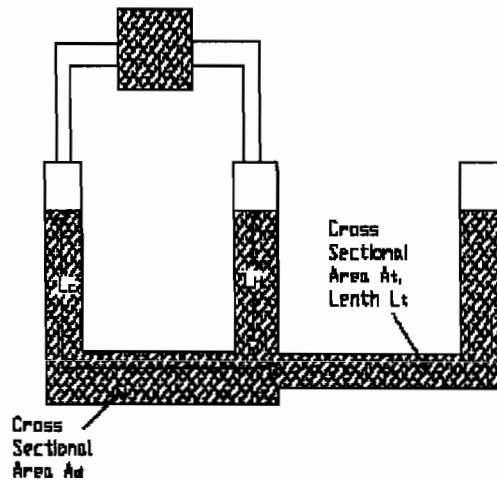
ω = Kecepatan Sudut (rad/s)

L_D = panjang pipa *displacer* (m)

f = frekuensi (Hz)

g = percepatan gravitasi (m/ s²)

Motor *Stirling* biasanya mempunyai kompresi yang rendah, jadi hampir dapat dipastikan jika kenaikan tekanan (P) lebih kecil daripada tekanan awal (P_m).



Gambar 2.2. Dua Pipa tabung yang di gabung

Persamaan untuk Frekuensi alami dari kolom penyetelan dengan *mixed isothermal* dan *adiabatic space* adalah :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_D}} \text{ Hz} \quad \dots \dots \dots \quad (2.6)$$

dengan :

L_D = panjang pipa *displacer* (m)

f = frekuensi (Hz)

g = percepatan gravitasi (m/ s²)

Untuk perhitungan tenaga mesin dengan *displacer*, *tuning column* dan *power output* yang terpisah, *Cook dan Yarbor* memberi persamaan :

$$W = P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4V_m T_e + T_c} \sin \theta \quad \dots \dots \dots \quad (2.7)$$

dengan :

V_o = Volume permukaan dari *tuning column* (m³)

V_e = Volume permukaan dari *displacer* (m³)

V_m = *mid-stroke volume* (m³)

P_m = Tekanan rerata (Pa)

T_e dan T_c = Temperatur antara sisi pemanas dan sisi pendingin (°K)

θ = Sudut antara *displacer* dan *tuning column* (90°)

f = frekuensi Osilasi (Hz)

Untuk mendapatkan ayunan yang bagus, idealnya sudut antara *displacer* dan *tuning column* adalah mendekati 90°.

Dalam perhitungan ini angka koreksi yang di pakai yaitu 0,3. temperature rendah atau motor yang kecil dimana rugi-rugi menjadi penting, oleh karena itu persamaan yang lebih akurat untuk tenaga *output* adalah :

$$W_{net} = 0,3 P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4V_m T_e + T_c} \sin \theta \quad \dots \dots \dots \quad (2.8)$$

Untuk perhitungan V_o , V_e , V_m , serta P_m dapat dilihat pada persamaan di bawah ini :

$$V_o = \frac{\pi}{4} \times D_{pompa}^2 \times \frac{L_{sisi pompa}}{100} \text{ m}^3 \quad \dots \dots \dots \quad (2.9)$$

$$V_e = \frac{2\pi x D_{displacer}^2 x L_{sisi displacer}}{4 \times 100} m^3 \quad \dots \dots \dots \quad (2.10)$$

$$V_m = \frac{0,5 x \pi x D_{pompa}^2 x L_{sisi displacer}}{4 \times 100} m^3 \quad \dots \dots \dots \quad (2.11)$$

$$P_{rerata} = \frac{(P_{awal} + P_{akhir})}{2} Pa$$

maka :

$$\begin{aligned} P_{rerata absolut} &= P_{rerata} + 100000 Pa \\ &= \frac{P_{rerata} + 100000 Pa}{100000} bar \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (2.12)$$

Sedangkan Daya *Output* pada pompa dapat dihitung dengan :

$$W_{out pompa} = \rho x g x L_t x \frac{Q}{1000 x 60} \text{ watt}$$

dengan :

$$\begin{aligned} \rho &= massa jenis air (kg/m³) \\ g &= percepatan gravitasi (m/s²) \\ L_t &= panjang Langkah sisi pompa (m) \\ Q &= Debit air (liter/menit) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots \quad (2.13)$$

Viscous losses merupakan kerugian di dalam tabung pada saat melakukan gerakan osilasi karena cairan merekat pada tabung. Untuk menentukan kerugian merekat ini dalam kaitannya dengan gerakan osilasi di dalam tabung. Ini diperlukan untuk menentukan apakah tabung itu sempit atau lebar.

Sehingga dapat ditentukan dengan R yang menjadi parameter *radiusnya* dan dapat dinyatakan dengan :

$$R = R_t \times \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\eta}} \quad m$$

dengan :

$$\begin{aligned} R_t &= \text{Diameter pompa} \quad (m) \\ f &= \text{frekuensi osilasi} \quad (Hz) \\ \rho &= \text{massa jenis air} \quad (kg/m^3) \\ \eta &= \text{viskositas} \quad (Pas) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Selanjutnya untuk *effisiensi fluidyne* dapat dihitung dengan rumus :

$$\mu_{fluidyne} = \frac{W_{net}}{W_{in}} \times 100\% \quad (2.15)$$

Sedangkan untuk *effisiensi pompa* dapat dihitung dengan menggunakan rumus :

$$\mu_{pompa} = \frac{W_{out,pompa}}{W_{net}} \times 100\% \quad (2.16)$$

Untuk perhitungan *Swept Volume* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\text{Swept Volume} = \frac{\pi}{4} \times (D_{pompa} \times 100 \text{ cm})^2 \times \chi_{displacer} \dots \text{cm}^3 \quad (2.17)$$

Perhitungan yang terakhir adalah perhitungan *Beale Number* yang berfungsi untuk mengetahui *engine-displacement*, yaitu dengan menggunakan rumus :

$$B_n = \frac{W_{out pompa}}{P_{rerata absolut} \times f \times Swept Volume} \dots \dots \dots \quad (2.18)$$

BAB III

ANALISA DATA DAN PERHITUNGAN

III.1. Data Percobaan

Pada percobaan ini suhu pada tangki pendingin di asumsikan seperti suhu udara di sekitar (suhu lingkungan) dan dengan Tekanan Awal 0.

3.1.1. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 12 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh.

Tabel 3.1. Data Percobaan 1

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	80,60	27,00	0,625	0	8,5	11,5	39,0	12	0,50	1
10	300	88,50	27,00	0,625	0	8,5	16,0	42,0	12	0,68	1
20	300	91,20	27,00	0,625	0	8,0	18,0	45,0	12	0,71	1
30	300	90,00	27,00	0,588	0	8,5	17,0	45,0	12	0,70	1
40	300	91,60	27,00	0,588	0	7,5	18,0	46,0	12	0,72	1
50	300	92,00	27,00	0,625	0	8,0	18,5	46,5	12	0,72	1
60	300	94,50	27,00	0,588	0	8,0	18,0	47,0	12	0,72	1

3.1.2. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 13 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh.

Tabel 3.2. Data Percobaan 2

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	98,30	27,00	0,555	0	7,0	9,0	40,0	13	0,45	2
10	300	103,20	27,00	0,526	0	6,0	14,5	45,5	13	0,53	2
20	300	103,80	27,00	0,555	0	6,5	14,0	43,5	13	0,52	2
30	300	99,60	27,00	0,588	0	8,0	14,0	41,0	13	0,52	2
40	300	100,80	27,00	0,625	0	7,5	14,5	42,0	13	0,58	2
50	300	101,40	27,00	0,588	0	7,5	14,0	43,5	13	0,58	2
60	300	100,60	27,00	0,588	0	8,0	14,0	44,0	13	0,57	2

3.1.3. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 14 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh.

Tabel 3.3. Data Percobaan 3

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	95,00	27,00	0,588	0	8,0	11,0	42,5	14	0,49	-3
10	300	98,90	27,00	0,588	0	7,5	14,0	42,0	14	0,58	-3
20	300	98,30	27,00	0,588	0	8,0	14,5	44,0	14	0,61	-3
30	300	99,60	27,00	0,588	0	7,5	16,5	46,0	14	0,67	-3
40	300	98,60	27,00	0,588	0	8,0	14,5	41,0	14	0,60	-3
50	300	100,30	27,00	0,588	0	8,0	17,0	46,0	14	0,68	-3
60	300	98,90	27,00	0,588	0	7,5	14,5	43,0	14	0,61	-3

3.1.4. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 15 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh.

Tabel 3.4. Data Percobaan 4

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	100,90	27,00	0,588	0	6,5	14,5	41,5	15	0,58	2
10	300	95,90	27,00	0,588	0	8,0	11,0	39,5	15	0,47	2
20	300	102,70	27,00	0,625	0	7,0	16,5	46,0	15	0,65	2
30	300	103,90	27,00	0,588	0	7,0	16,0	46,0	15	0,65	2
40	300	106,30	27,00	0,588	0	7,0	16,0	46,0	15	0,61	2
50	300	107,40	27,00	0,588	0	7,5	17,0	46,0	15	0,65	2
60	300	106,00	27,00	0,588	0	7,0	16,0	46,0	15	0,61	2

3.1.5. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 16 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.5. Data Percobaan 5

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	94,70	27,00	0,588	0	8,0	12,0	44,0	16	0,49	1
10	300	99,20	27,00	0,625	0	8,5	18,0	48,0	16	0,71	1
20	300	101,60	27,00	0,625	0	8,5	18,0	48,0	16	0,70	1
30	300	100,40	27,00	0,625	0	8,5	14,5	44,0	16	0,59	1
40	300	102,50	27,00	0,625	0	8,5	16,0	48,0	16	0,60	1
50	300	102,30	27,00	0,625	0	8,5	16,0	47,0	16	0,60	1
60	300	102,80	27,00	0,588	0	8,5	17,0	48,0	16	0,65	1

3.1.6. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 17 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.6. Data Percobaan 6

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	97,60	27,00	0,625	0	8,00	13,50	43,0	17	0,56	-2,5
10	300	94,40	27,00	0,625	0	8,00	11,00	42,0	17	0,50	-2,5
20	300	97,20	27,00	0,625	0	8,00	12,50	43,0	17	0,51	-2,5
30	300	98,50	27,00	0,625	0	8,00	13,50	43,0	17	0,53	-2,5
40	300	100,90	27,00	0,625	0	8,00	16,00	46,0	17	0,61	-2,5
50	300	100,30	27,00	0,588	0	8,50	14,50	43,0	17	0,59	-2,5
60	300	101,90	27,00	0,588	0	8,50	15,00	43,0	17	0,59	-2,5

3.1.7. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 18 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.7. Data Percobaan 7

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	96,30	27,00	0,588	0	8,0	13,0	42,0	18	0,50	-3,5
10	300	98,30	27,00	0,588	0	8,0	18,0	46,0	18	0,65	-3,5
20	300	98,60	27,00	0,625	0	8,5	18,0	46,0	18	0,65	-3,5
30	300	97,60	27,00	0,588	0	8,5	16,0	44,0	18	0,63	-3,5
40	300	97,40	27,00	0,625	0	8,5	15,5	44,0	18	0,61	-3,5
50	300	97,50	27,00	0,625	0	8,5	16,0	44,0	18	0,63	-3,5
60	300	97,50	27,00	0,625	0	8,5	16,0	44,0	18	0,63	-3,5

3.1.8. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 19 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.8. Data Percobaan 8

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	96,80	27,00	0,625	0	7,5	11,0	43,0	19	0,42	-0,5
10	300	98,40	27,00	0,588	0	8,5	13,0	44,0	19	0,53	-0,5
20	300	98,90	27,00	0,625	0	8,5	14,5	46,0	19	0,57	-0,5
30	300	97,10	27,00	0,588	0	8,5	14,0	44,0	19	0,53	-0,5
40	300	96,50	27,00	0,588	0	8,5	15,5	47,0	19	0,57	-0,5
50	300	97,90	27,00	0,588	0	8,5	13,0	44,0	19	0,53	-0,5
60	300	95,90	27,00	0,588	0	8,5	14,5	44,0	19	0,57	-0,5

3.1.9. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 30 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.9. Data Percobaan 9

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	101,00	27,00	0,625	0	6,0	12,0	42,0	30	0,50	-1,5
10	300	102,30	27,00	0,625	0	7,5	15,5	46,0	30	0,54	-1,5
20	300	102,10	27,00	0,625	0	7,5	15,0	46,0	30	0,50	-1,5
30	300	101,70	27,00	0,625	0	7,5	13,5	43,0	30	0,50	-1,5
40	300	101,80	27,00	0,625	0	7,5	13,0	45,0	30	0,50	-1,5
50	300	101,50	27,00	0,625	0	7,5	13,0	44,0	30	0,50	-1,5
60	300	102,40	27,00	0,625	0	7,5	15,0	46,0	30	0,50	-1,5

3.1.10. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 30 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup $\frac{1}{2}$ penuh

Tabel 3.10. Data Percobaan 10

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	89,50	27,00	0,625	0	10,0	8,0	14,0	30	0,320	-1
10	300	91,50	27,00	0,625	0	9,5	11,5	15,5	30	0,365	-1
20	300	96,20	27,00	0,625	0	9,5	11,0	15,0	30	0,325	-1
30	300	97,10	27,00	0,625	0	10,0	10,0	14,5	30	0,325	-1
40	300	98,70	27,00	0,625	0	10,0	9,0	15,0	30	0,325	-1
50	300	99,80	27,00	0,625	0	10,0	9,0	14,5	30	0,325	-1
60	300	96,50	27,00	0,625	0	10,0	11,0	15,5	30	0,325	-1

3.1.11. Percobaan dengan Variasi Head Pompa 40 cm

Diketahui :

Panas yang di pakai : 300 watt

Kran Panjang Osilasi tanpa beban di tutup penuh

Tabel 3.11. Data Percobaan 11

Waktu [menit]	W in [watt]	T Sisi Panas [C]	T Sekitar [C]	f Osilasi [Hz]	P Awal [Pa]	Osilasi Sisi Displacer [cm]	Langkah Sisi Pompa [cm]	Langkah Sisi Tanpa Beban [cm]	Head Total (cm)	Q Air (l/menit)	P Akhir [cm]
0	300	102,30	27,00	0,588	0	6,0	12,0	43,0	40	0,395	-4
10	300	101,90	27,00	0,625	0	7,0	14,0	46,0	40	0,465	-4
20	300	100,50	27,00	0,625	0	7,0	14,0	46,0	40	0,450	-4
30	300	100,90	27,00	0,625	0	7,5	14,0	46,0	40	0,450	-4
40	300	98,90	27,00	0,625	0	7,0	12,5	43,0	40	0,400	-4
50	300	99,30	27,00	0,625	0	7,5	12,5	43,0	40	0,420	-4
60	300	100,50	27,00	0,625	0	7,0	13,5	43,0	40	0,450	-4

III.2. Pengolahan dan Perhitungan Data

III.2.1. Pengolahan Data Percobaan 1

Berikut ini adalah contoh Perhitungan pada saat Variasi Head Pompa 12 cm dan pada waktu 10 menit

3.2.1.1. Perhitungan Tekanan Akhir

karena Tekanan akhir yang diukur masih dalam cm maka dalam perhitungan ini harus diubah satuananya kedalam Pa seperti pada persamaan (2.1.), sehingga :

$$P_{akhir} = \rho_{air} \times g \times P_{akhir} \text{ Pa}$$

dengan :

$$\rho = \text{massa jenis air (} 1000 \text{ kg/ m}^3 \text{)}$$

$$g = \text{percepatan Gravitasi (} 9,81 \text{ m/ s}^2 \text{)}$$

$$P_{akhir} = \text{Tekanan akhir (} 1 \text{ cm} = 0,01 \text{ m) }$$

maka

$$\begin{aligned} P_{akhir} &= 1000 \times 9,81 \times 0,01 \text{ Pa} \\ &= 98,1 \text{ Pa} \end{aligned}$$

3.2.1.2. Perhitungan Panjang *displacer* secara teoritis

Untuk perhitungan panjang *displacer* ini dapat dihitung seperti pada persamaan (2.2.), yakni :

$$L_D = \frac{g}{2\pi^2 f^2} \text{ m}$$

dengan :

$$g = \text{Percepatan gravitasi} (9,81 \text{ m/ s}^2)$$

$$f = \text{Frekuensi Osilasi} (0,625 \text{ Hz})$$

maka Panjang *displacer* secara teoritis

$$\begin{aligned} L_D &= \frac{9,81}{2\pi^2 0,625^2} \text{ m} \\ &= 1,272 \text{ m} \end{aligned}$$

3.2.1.3. Perhitungan Kecepatan Sudut pada Motor

Perhitungan Kecepatan Sudut ini dapat dihitung seperti pada persamaan (2.5.), yakni :

$$\omega = 2 \times \pi \times f \text{ rad/s}$$

dengan :

$$f = \text{Frekuensi Osilasi} (0,625 \text{ Hz})$$

maka :

$$\begin{aligned} \omega &= 2 \times \pi \times 0,625 \text{ rad/s} \\ &= 3,927 \text{ rad/s} \end{aligned}$$

3.2.1.4. Perhitungan *frekuensi alami*

frekuensi alami dapat dihitung seperti pada persamaan (2.6.), yakni :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_D}} \text{ Hz}$$

dengan:

$$g = \text{gaya Gravitasi} (9,81 \text{ m/ s}^2)$$

$$L_D = \text{Panjang } displacer (1,32 \text{ m})$$

$$L_D = \text{Panjang } displacer \text{ teoritis} (1,272 \text{ m})$$

Maka :

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times 9,81}{1,32}} \text{ Hz} \\ &= 0,614 \text{ Hz} \end{aligned}$$

sedangkan *frekuensi alami* secara teoritisnya adalah :

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2 \times 9,81}{1,272}} \text{ Hz} \\ &= 0,625 \text{ Hz} \end{aligned}$$

3.2.1.5. Perhitungan *Daya Output* pada motor

Perhitungan *Daya Output* pada motor dapat dihitung seperti pada persamaan (2.8.), yakni :

$$W_{net} = 0,3 P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4V_m T_e + T_c} \sin \theta$$

dengan :

$$V_o = \text{Volume permukaan dari } tuning \text{ column} (\text{ m}^3)$$

$$V_e = \text{Volume permukaan dari } displacer (\text{ m}^3)$$

$$V_m = \text{mid-stroke volume pada pompa} (\text{ m}^3)$$

$$P_m = \text{Tekanan rata-rata absolute} (\text{ Pa })$$

$$T_e \text{ dan } T_c = \text{Temperatur antara sisi pemanas dan sisi pendingin} (^\circ \text{K})$$

$$\theta = \text{Sudut antara } displacer \text{ dan } tuning \text{ column}$$

$$f = \text{frekuensi Osilasi (Hz)}$$

Untuk perhitungan Volume permukaan dari *tuning column* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.9.), yakni :

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{\pi}{4} \times D_{pompa}^2 \times \frac{L_{sisi pompa}}{100} \ m^3 \\ &= \frac{\pi \times 0,0127^2 \times 0,115}{4} \ m^3 \\ &= 1,456 \times 10^{-5} \ m^3 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk perhitungan Volume permukaan dari *displacer* dihitung dengan menggunakan persamaan (2.10.), yakni :

$$\begin{aligned} V_e &= \frac{2\pi \times D_{displacer}^2 \times L_{sisi displacer}}{4 \times 100} \ m^3 \\ &= \frac{\pi \times 0,0254^2 \times 8,5}{400} \ m^3 \\ &= 4,307 \times 10^{-5} \ m^3 \end{aligned}$$

Serta untuk perhitungan *mid-stoke volume* dari sisi pompa dihitung dengan menggunakan persamaan (2.11.), yakni :

$$\begin{aligned} V_m &= \frac{0,5 \times \pi \times D_{pompa}^2 \times L_{sisi displacer}}{4 \times 100} \ m^3 \\ &= \frac{0,5 \times \pi \times 0,0127^2 \times 8,5}{400} \ m^3 \\ &= 5,383 \times 10^{-6} \ m^3 \end{aligned}$$

Untuk perhitungan tekanan rata-rata harus diubah terlebih dahulu ke dalam *satuan british (bar)*, seperti pada persamaan (2.12.), yakni :

$$\begin{aligned} P_{\text{rerata}} &= \frac{(P_{\text{awal}} + P_{\text{akhir}})}{2} \text{ Pa} \\ &= \frac{(0 + 98,1)}{2} \text{ Pa} \\ &= 49,05 \text{ Pa} \end{aligned}$$

maka :

$$\begin{aligned} P_{\text{rerata absolut}} &= 49,05 + 100000 \text{ Pa} \\ &= 100049,05 \text{ Pa} \\ &= \frac{100049,05}{100000} \text{ bar} \\ &= 1,0005 \text{ bar} \end{aligned}$$

sehingga *Daya Output* nya adalah :

$$\begin{aligned} W_{\text{net}} &= 0,3 P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4 V_m T_e + T_c} \sin \theta \\ &= 0,3 \times 100049,05 \times 1,456 \times 10^{-5} \times 0,625 \times \pi \times \frac{4,307 \times 10^{-5} \times (353,6 - 300)}{5,383 \times 10^{-6} \times (353,6 + 300)} \text{ watt} \\ &= 0,444 \text{ watt} \end{aligned}$$

3.2.1.6. Perhitungan *Daya Output* pada pompa

Perhitungan *Daya Output* pada pompa dapat dihitung seperti pada persamaan (2.13.), yakni :

$$W_{out\ pompa} = \rho \times g \times L_t \times \frac{Q}{1000 \times 60} \text{ watt}$$

dengan :

ρ = massa jenis air (1000 kg/m³)

g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

L_t = panjang Langkah sisi pompa (11,5 = 0,115 m)

Q = Debit air (0,68 liter/ menit)

maka :

$$\begin{aligned} W_{out\ pompa} &= 1000 \times 9,81 \times \frac{11,5}{100} \times \frac{0,68}{1000 \times 60} \text{ watt} \\ &= 0,018 \text{ watt} \end{aligned}$$

3.2.1.7. Perhitungan *Viscous Losses*

Sedangkan perhitungan *Viscous Losses* dapat dihitung seperti pada persamaan (2.14.), yakni :

$$R = R_t \times \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\eta}} \text{ m}$$

dengan :

R_t = Diameter pompa (0,127 m)

f = frekuensi osilasi (0,625 Hz)

ρ = massa jenis air (1000 kg/m³)

η = viskositas (0,001 Pas)

maka :

$$\begin{aligned} R &= 0,127 \times \sqrt{\frac{2\pi \times 0,0625 \times 1000}{0,001}} \text{ m} \\ &= 25,167 \text{ m} \end{aligned}$$

3.2.1.8. Perhitungan *effisiensi fluidyne*

Perhitungan *effisiensi fluidyne* dapat dihitung seperti pada persamaan (2.15.), yakni :

$$\begin{aligned}\mu_{\text{fluidyne}} &= \frac{W_{\text{net}}}{W_{\text{in}}} \times 100\% \\ &= \frac{0,444}{300} \times 100\% \\ &= 0,148\%\end{aligned}$$

3.2.1.9. Perhitungan *effisiensi pompa*

Perhitungan *effisiensi pompa* dapat dihitung seperti pada persamaan (2.16.), yakni :

$$\begin{aligned}\mu_{\text{pompa}} &= \frac{W_{\text{out pompa}}}{W_{\text{net}}} \times 100\% \\ &= \frac{0,018}{0,444} \times 100\% \\ &= 4,005\%\end{aligned}$$

3.2.1.10. Perhitungan *swept volume*

Perhitungan *swept volume* dapat dihitung seperti pada persamaan (2.17.), yakni :

$$\begin{aligned}\text{Swept Volume} &= \frac{\pi}{4} \times (D_{\text{pompa}} \times 100 \text{ cm})^2 \times \text{Osilasi}_{\text{displacer}} \dots \dots \dots \text{cm}^3 \\ \text{Swept Volume} &= \frac{\pi}{4} \times (0,0127 \times 100)^2 \text{ cm}^2 \times 8,5 \\ &= 10,768 \text{ cm}^3\end{aligned}$$

3.2.1.11. Perhitungan *Beale Number*

Perhitungan *Beale Number* dapat dihitung seperti pada persamaan (2.18.), yakni :

$$\begin{aligned}
 B_n &= \frac{W_{out\ pompa}}{P_{rerata\ absolut} \times f \times Swept\ Volume} \\
 &= \frac{0,018}{1,0005 \times 0,625 \times 10,768} \\
 &= 0,0026
 \end{aligned}$$

Perhitungan dengan variasi yang lain dapat di hitung dengan cara yang sama dan dapat di lihat dalam tabel perhitungan di bawah ini :

Tabel 3.12. Data Perhitungan Percobaan 1

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami teoritis [Hz]	f alami teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,282	0,009	25,167	0,094	3,338	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0014
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,444	0,018	25,167	0,148	4,005	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0026
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,520	0,021	25,167	0,173	4,022	49,05	1E+05	1,0005	10,134	0,0033
98,1	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,454	0,019	24,411	0,151	4,287	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0031
98,1	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,492	0,021	24,411	0,164	4,311	49,05	1E+05	1,0005	9,501	0,0038
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,540	0,022	25,167	0,180	4,033	49,05	1E+05	1,0005	10,134	0,0034
98,1	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,511	0,021	24,411	0,170	4,144	49,05	1E+05	1,0005	10,134	0,0036

Tabel 3.13. Data Perhitungan Percobaan 2

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami teoritis [Hz]	f alami teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
196,2	1,613	1,320	3,487	0,614	0,555	0,254	0,007	23,716	0,085	2,611	98,1	1E+05	1,001	8,867	0,0013
196,2	1,796	1,320	3,305	0,614	0,526	0,411	0,013	23,088	0,137	3,058	98,1	1E+05	1,001	7,601	0,0031
196,2	1,613	1,320	3,487	0,614	0,555	0,421	0,012	23,716	0,140	2,824	98,1	1E+05	1,001	8,234	0,0026
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,425	0,012	24,411	0,142	2,802	98,1	1E+05	1,001	10,134	0,0020
196,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,474	0,014	25,167	0,158	2,898	98,1	1E+05	1,001	9,501	0,0023
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,434	0,013	24,411	0,145	3,058	98,1	1E+05	1,001	9,501	0,0024
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,430	0,013	24,411	0,143	3,034	98,1	1E+05	1,001	10,134	0,0022

Tabel 3.14. Data Perhitungan Percobaan 3

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,314	0,009	24,411	0,105	2,807	-147	99853	0,9985	10,134	0,0015
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,420	0,013	24,411	0,140	3,160	-147	99853	0,9985	9,501	0,0024
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,432	0,014	24,411	0,144	3,349	-147	99853	0,9985	10,134	0,0024
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,499	0,018	24,411	0,166	3,619	-147	99853	0,9985	9,501	0,0032
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,433	0,014	24,411	0,144	3,282	-147	99853	0,9985	10,134	0,0024
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,519	0,019	24,411	0,173	3,642	-147	99853	0,9985	10,134	0,0032
-294,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,435	0,014	24,411	0,145	3,324	-147	99853	0,9985	9,501	0,0026

Tabel 3.15. Data Perhitungan Percobaan 4

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,447	0,014	24,411	0,149	3,077	98,1	1E+05	1,001	8,234	0,0028
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,318	0,008	24,411	0,106	2,654	98,1	1E+05	1,001	10,134	0,0014
196,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,552	0,018	25,167	0,184	3,175	98,1	1E+05	1,001	8,867	0,0032
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,511	0,017	24,411	0,170	3,328	98,1	1E+05	1,001	8,867	0,0033
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,525	0,016	24,411	0,175	3,040	98,1	1E+05	1,001	8,867	0,0031
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,565	0,018	24,411	0,188	3,200	98,1	1E+05	1,001	9,501	0,0032
196,2	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,523	0,016	24,411	0,174	3,050	98,1	1E+05	1,001	8,867	0,0031

Tabel 3.16. Data Perhitungan Percobaan 5

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
98,1	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,342	0,010	24,411	0,114	2,812	49,05	1E+05	1,0005	10,134	0,0016
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,577	0,021	25,167	0,192	3,619	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0031
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,594	0,021	25,167	0,198	3,466	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0031
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,472	0,014	25,167	0,157	2,964	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0021
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,534	0,016	25,167	0,178	2,939	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0023
98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,533	0,016	25,167	0,178	2,946	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0023
98,1	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,536	0,018	24,411	0,179	3,373	49,05	1E+05	1,0005	10,768	0,0029

Tabel 3.17. Data Perhitungan Percobaan 6

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
-245,3	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,424	0,012	25,167	0,141	2,917	-123	99877	0,9988	10,134	0,0020
-245,3	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,331	0,009	25,167	0,110	2,688	-123	99877	0,9988	10,134	0,0014
-245,3	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,390	0,010	25,167	0,130	2,670	-123	99877	0,9988	10,134	0,0016
-245,3	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,429	0,012	25,167	0,143	2,730	-123	99877	0,9988	10,134	0,0018
-245,3	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,523	0,016	25,167	0,174	3,051	-123	99877	0,9988	10,134	0,0025
-245,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,443	0,014	24,411	0,148	3,133	-123	99877	0,9988	10,768	0,0022
-245,3	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,467	0,014	24,411	0,156	3,073	-123	99877	0,9988	10,768	0,0023

Tabel 3.18. Data Perhitungan Percobaan 7

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
-343,4	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,377	0,011	24,411	0,126	2,817	-172	99828	0,9983	10,134	0,0018
-343,4	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,536	0,019	24,411	0,179	3,569	-172	99828	0,9983	10,134	0,0032
-343,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,572	0,019	25,167	0,191	3,346	-172	99828	0,9983	10,768	0,0028
-343,4	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,472	0,016	24,411	0,157	3,490	-172	99828	0,9983	10,768	0,0026
-343,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,485	0,015	25,167	0,162	3,187	-172	99828	0,9983	10,768	0,0023
-343,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,501	0,016	25,167	0,167	3,288	-172	99828	0,9983	10,768	0,0025
-343,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,501	0,016	25,167	0,167	3,288	-172	99828	0,9983	10,768	0,0025

Tabel 3.19. Data Perhitungan Percobaan 8

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
-49,05	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,342	0,008	25,167	0,114	2,208	-24,5	99975	0,9998	9,501	0,0013
-49,05	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,388	0,011	24,411	0,129	2,903	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0018
-49,05	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,463	0,013	25,167	0,154	2,893	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0020
-49,05	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,411	0,012	24,411	0,137	2,951	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0019
-49,05	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,452	0,014	24,411	0,151	3,198	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0023
-49,05	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,386	0,011	24,411	0,129	2,921	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0018
-49,05	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,419	0,013	24,411	0,140	3,195	-24,5	99975	0,9998	10,768	0,0021

Tabel 3.20. Data Perhitungan Percobaan 9

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,393	0,010	25,167	0,131	2,472	-73,6	99926	0,9993	7,601	0,0020
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,515	0,014	25,167	0,172	2,655	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0023
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,498	0,012	25,167	0,166	2,464	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0021
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,446	0,011	25,167	0,149	2,476	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0019
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,430	0,011	25,167	0,143	2,473	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0018
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,428	0,011	25,167	0,143	2,482	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0018
-147,2	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,499	0,012	25,167	0,166	2,455	-73,6	99926	0,9993	9,501	0,0021

Tabel 3.21. Data Perhitungan Percobaan 10

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm3]	Beale Number [Bn]
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,225	0,004	25,167	0,075	1,859	-49,1	99951	0,9995	12,668	0,0005
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,333	0,007	25,167	0,111	2,061	-49,1	99951	0,9995	12,034	0,0009
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,339	0,006	25,167	0,113	1,722	-49,1	99951	0,9995	12,034	0,0008
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,312	0,005	25,167	0,104	1,703	-49,1	99951	0,9995	12,668	0,0007
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,287	0,005	25,167	0,096	1,669	-49,1	99951	0,9995	12,668	0,0006
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,291	0,005	25,167	0,097	1,646	-49,1	99951	0,9995	12,668	0,0006
-98,1	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,341	0,006	25,167	0,114	1,716	-49,1	99951	0,9995	12,668	0,0007

Tabel 3.22. Data Perhitungan Percobaan 11

P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
-392,4	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,375	0,008	24,411	0,125	2,067	-196	99804	0,998	7,601	0,0017
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,463	0,011	25,167	0,154	2,300	-196	99804	0,998	8,867	0,0019
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,455	0,010	25,167	0,152	2,263	-196	99804	0,998	8,867	0,0019
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,457	0,010	25,167	0,152	2,252	-196	99804	0,998	9,501	0,0017
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,398	0,008	25,167	0,133	2,052	-196	99804	0,998	8,867	0,0015
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,400	0,009	25,167	0,133	2,144	-196	99804	0,998	9,501	0,0014
-392,4	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,439	0,010	25,167	0,146	2,263	-196	99804	0,998	8,867	0,0018

Tabel 3.23. Data Perhitungan rata-rata tiap-tiap Percobaan

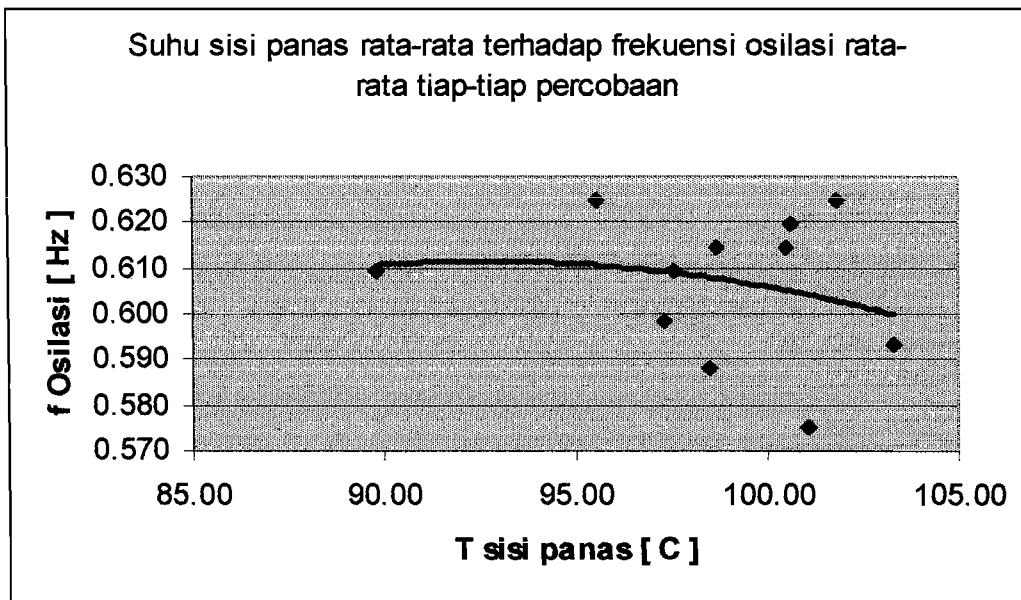
Percobaan	P Akhir [Pa]	Ld teoritis [m]	Ld [m]	ω [rad/s]	f alami [Hz]	f teoritis [Hz]	W net [watt]	W out pompa [watt]	Viscous Loss [m]	η fluidyne [%]	η pompa [%]	P Rerata [Pa]	P Rerata, abs [Pa]	P Rerata, abs [bar]	Swept Vol. [cm ³]	Beale Number [Bn]
1	98,10	1,343	1,320	3,827	0,614	0,609	0,463	0,0188	24,843	0,154	4,020	49,050	100049,050	1,0005	10,315	0,0030
2	196,20	1,515	1,320	3,613	0,614	0,575	0,407	0,0119	24,131	0,136	2,898	98,100	100098,100	1,0010	9,139	0,0023
3	-294,30	1,437	1,320	3,695	0,614	0,588	0,436	0,0146	24,411	0,145	3,312	-147,150	99852,850	0,9985	9,863	0,0025
4	196,20	1,414	1,320	3,728	0,614	0,593	0,492	0,0152	24,519	0,164	3,075	98,100	100098,100	1,0010	9,048	0,0029
5	98,10	1,319	1,320	3,861	0,614	0,614	0,513	0,0164	24,951	0,171	3,160	49,050	100049,050	1,0005	10,677	0,0025
6	-245,25	1,319	1,320	3,861	0,614	0,614	0,429	0,0125	24,951	0,143	2,895	-122,625	99877,375	0,9988	10,315	0,0020
7	-343,35	1,343	1,320	3,827	0,614	0,609	0,492	0,0163	24,843	0,164	3,284	-171,675	99828,325	0,9983	10,587	0,0025
8	-49,05	1,390	1,320	3,761	0,614	0,599	0,409	0,0119	24,627	0,136	2,895	-24,525	99975,475	0,9998	10,587	0,0019
9	-147,15	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,458	0,0115	25,167	0,153	2,496	-73,575	99926,425	0,9993	9,229	0,0020
10	-98,10	1,272	1,320	3,927	0,614	0,625	0,304	0,0054	25,167	0,101	1,768	-49,050	99950,950	0,9995	12,487	0,0007
11	-392,40	1,296	1,320	3,894	0,614	0,620	0,427	0,0094	25,059	0,142	2,191	-196,200	99803,800	0,9980	8,867	0,0017

BAB IV

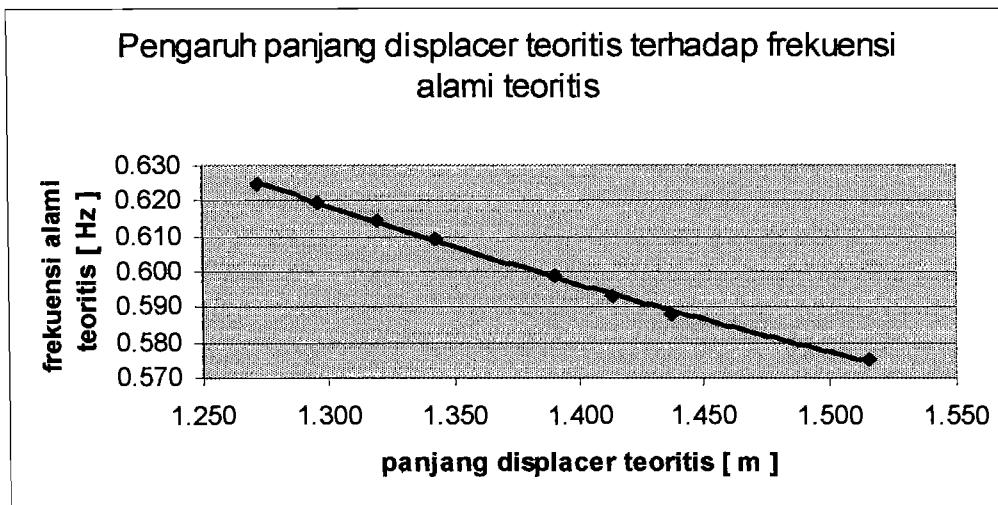
PEMBAHASAN

Dari Tabel 3.23. maka akan didapatkan hubungan antara :

- Panjang displacer terhadap frekuensi alami



Gambar 4.1. Grafik suhu sisi panas rata-rata vs frekuensi Osilasi rata-rata tiap-tiap percobaan



Gambar 4.2. Grafik panjang displacer teoritis vs frekuensi alami

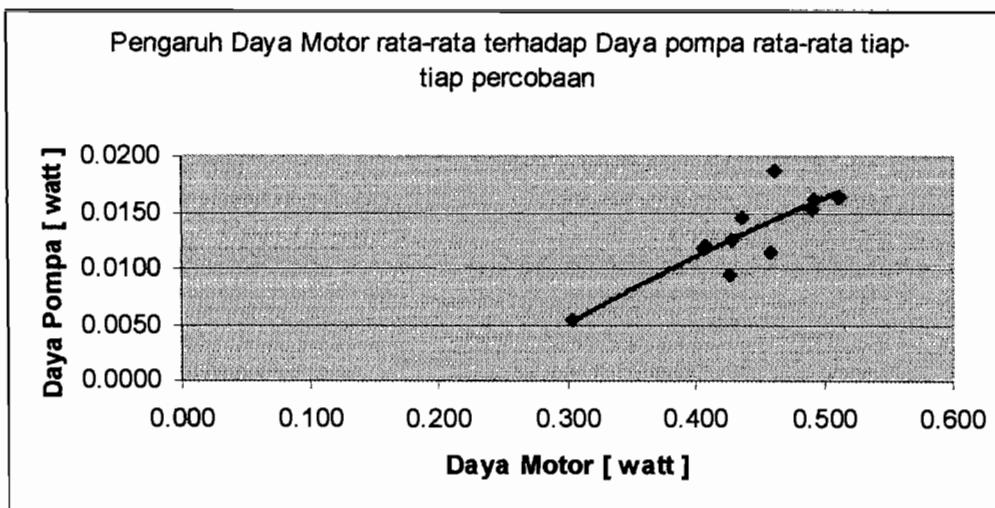
Dari gambar 4.2. di atas dapat diketahui bahwa semakin besar panjang *displacer* teoritis maka *frekuensi alami* teoritisnya akan semakin kecil, hal ini di karenakan :

1. Dari rumus panjang *displacer* $L_D = \frac{g}{2\pi^2 f^2} \text{ cm}$ dapat diketahui bahwa,

besar kecilnya *frekuensi Osilasi* dapat mempengaruhi panjang *displacer*, akan tetapi *frekuensi Osilasi* juga di pengaruhi oleh temperatur sisi panas yang terjadi. Semakin besar suhu pada sisi panas maka akan menyebabkan *frekuensi Osilasi* yang terjadi semakin kecil (Gambar 4.1.), akan tetapi semakin kecil *frekuensi Osilasi* yang terjadi maka akan menyebabkan panjang *displacer* bertambah panjang.

2. Dari rumus *frekuensi alami* $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_D}}$ Hz dan dari hasil percobaan yang dilakukan, *frekuensi alami* yang terjadi sebesar 0,614 Hz dengan panjang *displacer* 1,32 m, sedangkan dari hasil penghitungan *frekuensi alami* secara teori yang terjadi sebesar kurang lebih 0,607 Hz dengan panjang *displacer* 1,357 m.

b. Daya Motor terhadap Daya Pompa



Gambar 4.3. Grafik Daya Motor vs Daya Pompa

Dari gambar 4.3. diatas dapat kita ketahui bahwa daya motor yang lebih besar akan menghasilkan daya pemompaan yang lebih besar pula, hal ini dikarenakan :

1. Dari rumus $W_{net} = 0,3P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4V_m T_e + T_c} \sin \theta$ dapat diketahui bahwa besar kecilnya W_{net} tergantung dari besar kecilnya :

- a. Dari rumus $V_o = \frac{\pi}{4} \times D_{pompa}^2 \times \frac{L_{sisi pompa}}{100} m^3$ dapat kita ketahui

bahwa semakin besar Diameter pompa dan semakin besar panjang langkah sisi pompa, maka volume permukaan *tuning column* akan bertambah besar pula sehingga menyebabkan daya motor yang dihasilkan juga semakin besar.

- b. Dari rumus $V_e = \frac{2\pi \times D_{displacer}^2 \times L_{sisi displacer}}{4 \times 100} m^3$ dapat diketahui

bahwa semakin besar Diameter pompa dan semakin besar panjang langkah sisi *displacer*, maka volume permukaan sisi *displacer* akan bertambah besar pula sehingga menyebabkan daya motor yang dihasilkan juga semakin besar.

- c. Dari rumus $V_m = \frac{0,5 \times \pi \times D_{pompa}^2 \times L_{sisi displacer}}{4 \times 100} m^3$ dapat

diketahui bahwa semakin besar Diameter pompa dan semakin besar panjang langkah sisi *displacer*, maka *mid-stroke volume* akan bertambah besar pula, akan tetapi akan menyebabkan Daya Motor yang dihasilkan semakin kecil

- d. Dari rumus $P_{rerata} = \frac{(P_{awal} + P_{akhir})}{2} Pa$ dapat diketahui

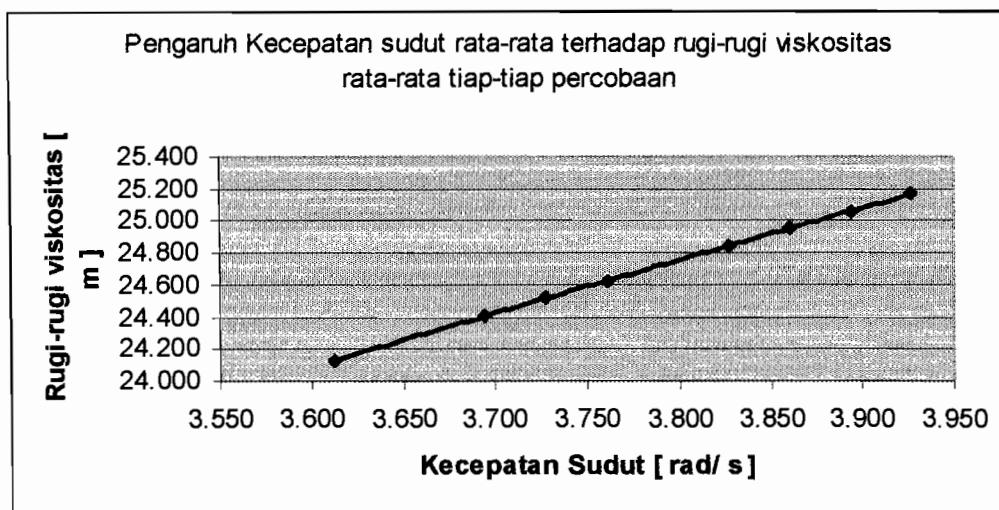
bahwa semakin besar tekanan akhir yang terjadi maka Tekanan

rata-rata yang terjadi akan bertambah besar pula sehingga menyebabkan Daya Motor yang dihasilkan juga semakin besar.

2. Sedangkan dari rumus $W_{out\ pompa} = \rho \times g \times L_t \times \frac{Q}{1000 \times 60}$ watt

dapat diketahui bahwa semakin besar panjang langkah sisi pompa dan semakin besar debit air yang dihasilkan maka daya *output* pada pompa akan bertambah besar pula. Akan tetapi besar kecilnya debit air yang dihasilkan tergantung dari tinggi rendahnya *head* pompa dan juga panjang langkah sisi pompa tergantung dari besar kecilnya suhu pada sisi panas.

c. Kecepatan sudut terhadap Rugi-rugi viskositas



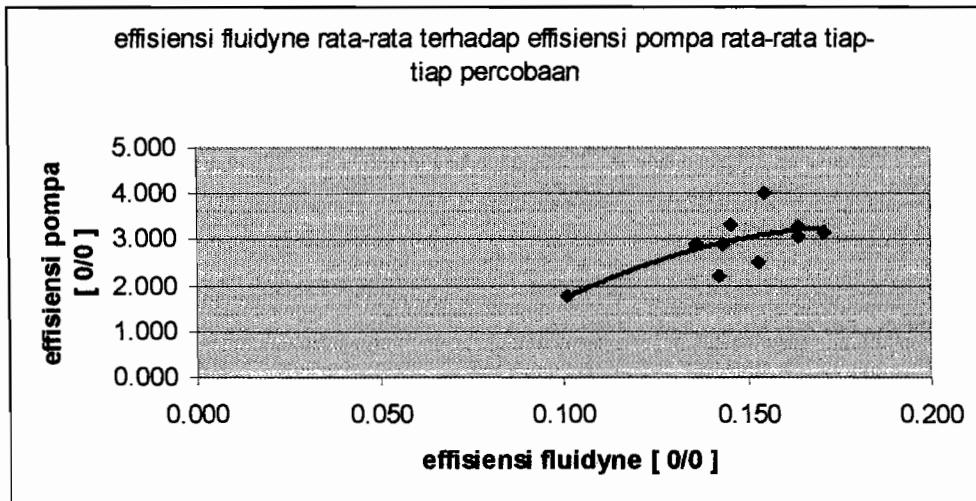
Gambar 4.4. Grafik Kecepatan sudut vs Rugi-rugi Viskositas

Dari Gambar 4.4. di atas dapat diketahui bahwa semakin besar rugi-rugi viskositas yang terjadi maka kecepatan sudut yang terjadi semakin besar pula, hal ini dikarenakan :

1. Dari rumus $\omega = 2\pi \cdot f$ dapat diketahui bahwa semakin besar *frekuensi Osilasi* yang terjadi, maka kecepatan sudut yang terjadi akan bertambah besar pula, akan tetapi dari rumus rugi-rugi *viskositas*

$R = R_0 \times \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\eta}}$ m jika *frekuensi osilasi* besar maka rugi-rugi *viskositas* yang terjadi semakin besar.

d. *effisiensi fluidyne terhadap effisiensi pompa*



Gambar 4.5. Grafik *effisiensi fluidyne* vs *effisiensi pompa*

Dari Gambar 4.5. di atas dapat diketahui bahwa *effisiensi pompa* bertambah besar jika *effisiensi fluidyne* bertambah besar pula, hal ini di karenakan :

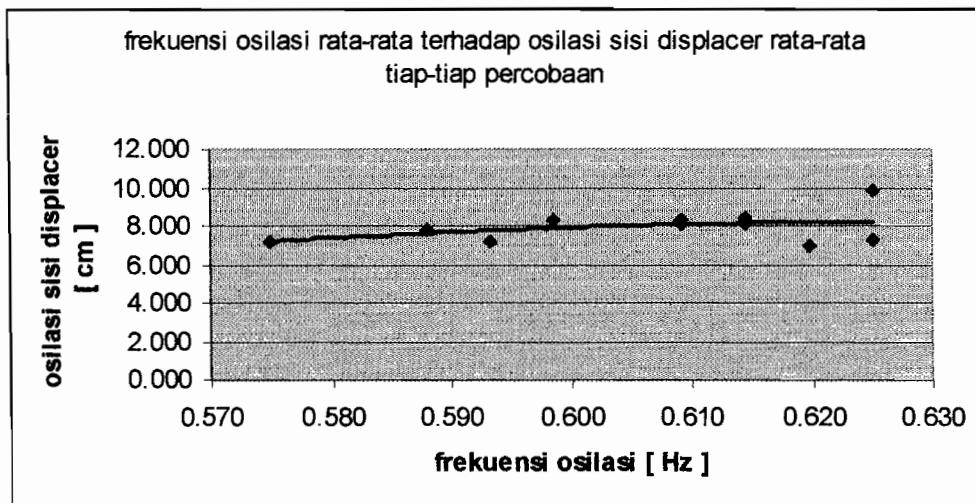
1. Dari rumus $\mu_{fluidyne} = \frac{W_{net}}{W_{in}} \times 100\%$ dapat diketahui bahwa semakin besar

Daya Motor yang terjadi maka semakin besar pula *effisiensi fluidyne* yang dihasilkan dan

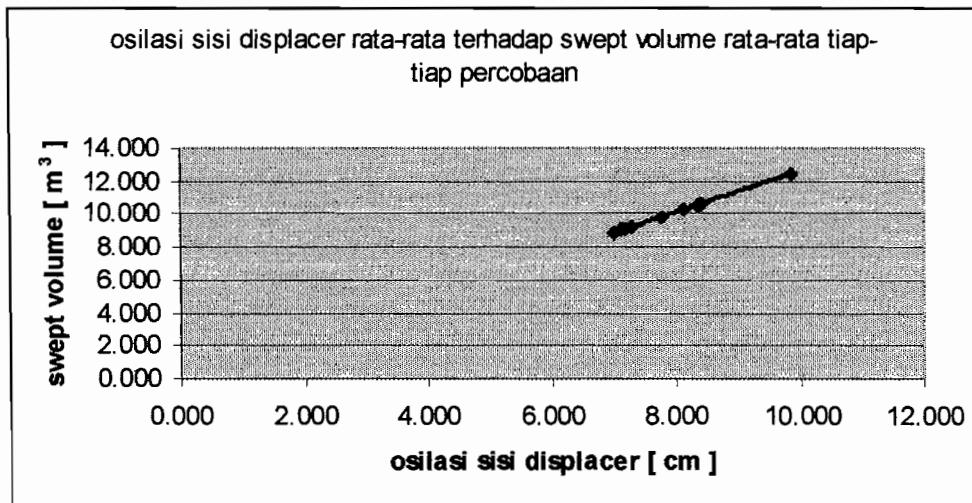
2. Dari rumus $\mu_{pompa} = \frac{W_{out\ pompa}}{W_{net}} \times 100\%$ dapat diketahui bahwa semakin

besar Daya *output* pada pompa maka semakin besar pula *effisiensi pompa* yang dihasilkan.

e. *frekuensi osilasi terhadap swept volume*



Gambar 4.6. Grafik frekuensi osilasi vs osilasi sisi displacer



Gambar 4.7. Grafik osilasi sisi displacer vs swept volume

Dari Gambar 4.7. di atas dapat diketahui bahwa *swept volume* akan bertambah besar apabila *osilasi sisi displacer* juga bertambah besar pula, akan tetapi *osilasi sisi displacer* juga dipengaruhi oleh *frekuensi osilasi* yang terjadi (Gambar 4.6), sehingga besar kecilnya swept volume tergantung pada besar kecilnya *frekuensi osilasi* yang terjadi.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

V.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan dan analisis pada *Motor Stirling* dengan menggunakan pendingin, dapat ditarik beberapa kesimpulan:

1. Dari rumus $\omega = \sqrt{\frac{2g}{L_D}}$ rad/s atau $\omega = 2\pi f$, jika *Frekuensi Osilasi* besar

maka Kecepatan Sudut pada motor juga akan bertambah besar pula sehingga

frekuensi alami $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{L_D}}$ yang terjadi juga bertambah besar. Akan tetapi

dalam percobaan kali ini *frekuensi alami* yang terjadi sebesar 0,614 Hz karena panjang *displacer* yang digunakan 1,32 m sedangkan hasil dari perhitungan secara teoritis dihasilkan *frekuensi alami teoritisnya* sebesar 0,607 karena panjang *displacer* hasil dari perhitungan secara teoritis sebesar 1,357 m.

2. Dari rumus $W_{net} = 0,3 P_m V_o f \pi \frac{V_e T_e - T_c}{4V_m T_e + T_c} \sin \theta$ jika Volume *displacer* dan

Volume *tuning column besar* serta *mid-stroke volume* kecil maka motor menghasilkan daya yang besar pula. Akan tetapi Volume *displacer*, Volume *tuning column*, maupun *mid-stroke volume* masih dipengaruhi oleh Diameter pompa dan panjang langkah sisi pompa maupun Diameter *displacer* dan panjang langkah sisi *displacer*.

3. Dari rumus $W_{out\ pompa} = \rho \times g \times L_t \times \frac{Q}{1000 \times 60}$ watt , jika panjang langkah sisi pompa bertambah besar maka akan menyebabkan debit air yang tinggi sehingga W_{out} pompa akan semakin besar pula. Untuk memperoleh Daya *Output* pada pompa yang lebih besar maka perbedaan temperatur antara sisi panas dengan sisi pendingin harus besar, selain itu Daya input pada motor juga harus lebih besar pula, akan tetapi tinggi *head* pompa juga mempengaruhi besar kecilnya panjang langkah sisi pompa.
4. Dari rumus $R = R_0 \sqrt{\frac{2\pi f \rho}{\eta}}$, jika *Frekuensi Osilasi* bertambah besar maka akan menghasilkan Rugi-rugi Viskositas yang besar pula, akan tetapi besar kecilnya Diameter pompa lebih mempengaruhi rugi-rugi *viskositas* yang terjadi.
5. Dari rumus $\mu_{fluidyne} = \frac{W_{net}}{W_{in}} \times 100\%$ dan $\mu_{pompa} = \frac{W_{out\ pompa}}{W_{net}} \times 100\%$, jika W_{net} lebih besar dari pada W_{in} maka *effisiensi fluidyne* yang terjadi semakin tinggi akan tetapi W_{net} harus lebih kecil dari W_{out} pompa supaya dapat menghasilkan *effisiensi pompa* yang lebih besar.
6. Dari rumus $Swept\ Volume = \frac{\pi}{4} \times (D_{pompa} \times 100\ cm)^2 \times Osilasi_{displacer}$, jika diameter pompa lebih besar dan osilasi sisi displacer juga besar maka swept volume yang terjadi akan bertambah besar pula, akan tetapi *Beale Number*

yang dihasilkan akan lebih kecil dan bahkan tidak memenuhi standar dari harga *Beale Number* yang berkisar 0,011 – 0,015.

7. Motor *Stirling* ini tidak dapat bekerja untuk memompa air dengan ketinggian lebih dari 40 cm karena W_{in} yang digunakan hanya 300 watt.
8. *Error* yang terjadi pada *Stirling* ini jika suhu di dalam tabung *Displacer* mencapai 110 °C, karena pada saat mencapai suhu tersebut motor *Stirling* tidak dapat bekerja meskipun secara teori perbedaan temperaturlah yang menyebabkan motor *Stirling* bekerja. Akan tetapi suhu di dalam motor *Stirling* dapat di turunkan dengan cara membuka kran pada sisi tanpa beban sehingga motor *Stirling* tersebut dapat bekerja lagi sebagaimana mestinya.

V.2 Saran

Sehubungan alat ini masih jauh dari sempurna, maka penulis untuk memberikan saran-saran guna pengembangan yang lebih baik. Agar alat ini menjadi lebih baik antara lain:

1. Untuk memompa air pada ketinggian yang lebih dalam, maka Daya yang dipakai pada motor *Stirling* di usahakan lebih besar, karena Daya yang dipakai juga mempengaruhi ketinggian Head Pompa.
2. Penyambungan pada suatu bagian motor dengan bagian motor yang lain dengan menggunakan *plastic steel atau sealer* di usahakan rapat dan rapi sehingga tidak terjadi kebocoran.
3. Usahakan motor *Stirling* di dinginkan dengan suhu setara dengan suhu sekitar lingkungan terlebih dahulu jika ingin dipakai lagi, dan air yang dipakai

sebelumnya haruslah diganti karena massa jenis air telah mengalami kenaikan akibat panas yang di terima dari solder.

4. Usahakan sirkulasi air secara teratur, sehingga dapat mempengaruhi suhu di dalam tabung *displacer* dan memberikan peluang yang lebih banyak terhadap motor *Stirling* untuk bekerja.

DAFTAR PUSTAKA

Frank Kyei-Manu and Aloysius Obodoako, *Design and Development of a Liquid Piston Stirling Engine*, E90 Senior Design Project Report, 2006

Yunus A. Cengel and Michael A. Boles, *Thermodynamics an Engineering Approach*, International Edition

Drs. Raja Ulungen Ginting, *Dasar-dasar Termodinamika Teknik*, Dept. Pendidikan dan Kebudayaan, Jakarta, 1989

Harijono Djojodihardjo, *Termodinamika Teknik, Aplikasi dan Termodinamika Statistik*, PT. Gramedia, Jakarta, 1987

Laporan Rancang Bangun Mesin, *Permodelan Stirling Engine Type Rimboom dengan kapasitas 32,1536 cm³*, 2005



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANATA DHARMA
Kampus III, Palagan Maguwoharjo, Sleman -Yogyakarta
Telp.(0274) 883037, 883968, 886530; Fax.(0274) 886529; Email :teknik@staff.usd.ac.id

BLANGKO PERMOHONAN SOAL TUGAS AKHIR

Kepada Yth.
Ketua Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknik Univ. Sanata Dharma
Yogyakarta

Dengan hormat,

Bersama ini, saya :

Nama : TULISTIONO
No. Mhs : 985214098

Mengajukan permohonan soal Tugas Akhir, untuk mata kuliah :
Rekayasa Tenaga Surya

Dosen Pembimbing Utama : In FA Rusdi Sambada M.T.

Dengan nilai mata kuliah pendukung :

NO	Kode MK	Mata Kuliah	Nilai
1	TMT 463	Rekayasa Tenaga Surya	B
2			
3			
4			
5			

Demikian permohonan saya, atas perhatiannya diucapkan terima kasih.

Yogyakarta,

Mahasiswa Ybs.

Menyetujui,

Ketua Program Studi Teknik Mesin

Syafiqah
.....
Sopert Agusworo, C.,

Rifandi

(..... TULISTIONO



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANATA DHARMA
Kampus III, Palagan Maguwoharjo, Sleman -Yogyakarta
Telp.(0274) 883037, 883968, 886530; Fax.(0274) 886529; Email :teknik@staff.usd.ac.id

SOAL TUGAS AKHIR
JURUSAN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIV. SANATA DHARMA YOGYAKARTA

Diberikan kepada :

Nama : TULISTONO
No. Mahasiswa : 985214098

Judul / naskah soal :

Motor Stirling Fislon Air dengan ~~Pelumasan~~ Pendingin

Tanggal dimulai :

Dosen Pembimbing II

Yogyakarta,
Pembimbing Utama

(.....)

(.....)

SETELAH DAPAT SOAL TA, DIMOHON BLONGKO INI
SEGERA DISERAHKAN KE SEKRETARIAT FT-USD

UNTUK MENDAPATKAN NOMOR SOAL DAN KARTU BIMBINGAN



JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK - UNIVERSITAS SANATA DHARMA

Kampus III, Paingan Maguwoharjo, Sleman - Yogyakarta
Telp. (0274) 883037, 883968, 886530; Fax. (0274) 886529; Email : mechanical@staff.usd.ac.id

BLANGKO PERMOHONAN PERPANJANGAN SOAL TUGAS AKHIR

Kepada Yth.
Ketua Program Studi Teknik Mesin
Fakultas Teknik Univ. Sanata Dharma
Yogyakarta

Dengan hormat,

Nama : TULISTIONO
NIM : 985214098

Mengajukan permohonan perpanjangan Soal Tugas Akhir untuk semester Gasal tahun akademik 2006/2007

Judul : Motor Stirling Pirton Air dengan Regenerator Pendingin

Demikian permohonan kami, atas perhatiannya diucapkan terima kasih.

Yogyakarta,

Menyetujui
Dosen Pembimbing TA

TULISTIONO



JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SANATA DHARMA
Kampus III, Paingen Maguwoharjo, Sleman -Yogyakarta
Telp.(0274) 883037, 883968, 886530; Fax.(0274) 886529; Email : teknik@staff.usd.ac.id

UJIAN PENDADARAN TUGAS AKHIR / SKRIPSI
TANGGAL : 1 Desember 2006

NAMA Mhs. : Tulistiono

NIM : 985214098

JUDUL :
[*Motor Stirling Piston Air dengan Menggunakan Pendingin*]

Pembimbing Utama : Ir. FA. Rusdi Sambada, M.T.
Pembimbing Kedua :

USULAN REVISI DARI DOSEN PENGUJI

1. 1 lembar untuk mahasiswa
2. 1 lembar untuk dosen pembimbing

- tulisan harus
- ① rata kiri-kanan
- ② hal 10 , harus disertai dengan keterangan gambar
- ③ Tulisan angka → pakai komma Bukan pakai titik.
- ④ Draft Pusaka & Afasy di kirim