

**DESAIN DAN PEMBUATAN MESIN STIRLING TENAGA
MATAHARI DENGAN MEMANFAATKAN PEMANAS
MATAHARI TIPE *BOX* UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK**

SKRIPSI

Oleh:

ZULFI FARIDA ALFIANTI

NIM. 12640006



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

**DESAIN DAN PEMBUATAN MESIN STIRLING TENAGA MATAHARI
DENGAN MEMANFAATKAN PEMANAS MATAHARI TIPE BOX
UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**ZULFI FARIDA ALFIANTI
NIM. 12640006**

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2016**

HALAMAN PERSETUJUAN

DESAIN DAN PEMBUATAN MESIN STIRLING TENAGA MATAHARI
DENGAN MEMANFAATKAN PEMANAS MATAHARI TIPE *BOX* UNTUK
PEMBANGKIT LISTRIK

SKRIPSI

Oleh:
ZULFI FARIDA ALFIANTI
NIM. 12640006

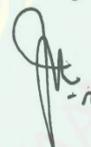
Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji:
Pada tanggal: 1 Agustus 2016

Pembimbing I,



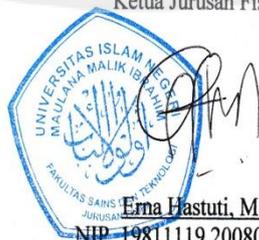
Farid Samsu Hananto, M.T
NIP.19740513 200312 1 001

Pembimbing II,



Umayyatus Syarifah, M.A
NIP. 19820925 200901 2 005

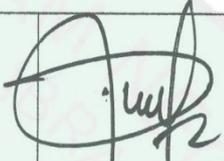
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

Oleh:
ZULFI FARIDA ALFIANTI
NIM.12640006

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Tanggal: 25 Agustus 2016

Penguji Utama	: <u>Drs. M. Tirono, M.Si</u> NIP. 19641211 199111 1 001	
Ketua Penguji	: <u>Irjan, M.Si</u> NIP. 19691231 200604 1 003	
Sekretaris Penguji	: <u>Farid Samsu Hananto, M.T</u> NIP.19740513 200312 1 001	
Anggota Penguji	: <u>Umaiyatus Syarifah, M.A</u> NIP. 19820925 200901 2 005	

Mengesahkan,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Zulfi Farida Alfianti
NIM : 12640006
Jurusan : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi
Judul Penelitian : Desain dan Pembuatan Mesin Stirling Tenaga Matahari
Dengan Memanfaatkan Pemanas Matahari Tipe Box
Untuk Pembangkit Listrik

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa hasil penelitian saya ini tidak terdapat unsur-unsur penjiplakan karya penelitian atau karya ilmiah yang pernah dilakukan atau dibuat oleh orang lain, kecuali yang tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata hasil penelitian ini terbukti terdapat unsur-unsur jiplakan maka saya bersedia untuk mempertanggung jawabkan, serta diproses sesuai peraturan yang berlaku.

Malang, 25 Agustus 2016
Yang Membuat Pernyataan,



Zulfi Farida Alfianti
NIM. 12640006

MOTTO

وَأَنْ لَّيْسَ لِلْإِنْسَانِ إِلَّا مَا سَعَى ﴿٣٩﴾

“Dan bahwasanya seorang manusia tiada memperoleh selain apa yang telah diusahakannya.” (Q.S an-Najm: 39).

“Kejeniusan itu hanya satu persen saja, yang sembilan puluh sembilan persennya adalah inspirasi dan keringat.”

“Thomas Alfa Edison”

HALAMAN PERSEMBAHAN



Alhamdulillahirobbil'alamin, tak henti-henti aku bersyukur kepada Allah Swt atas segala ni'mat yang telah diberikan, sehingga dapat kupersembahkan karya kecilku ini untuk orang-orang yang kusayangi:

Kepada Ayah Ibu tercinta

Bapak Sudarsono dan Ibu Surati sebagai motivator terbesar dalam hidupku yang tak pernah jemu mendo'akan dan menyayangiku, atas semua pengorbanan dan kesabaran mengantarkanku sampai kini. Tak pernah cukup ku membalas cinta ayah bunda padaku.

Kepada saudaraku

Teruntuk adikku Wizar Tanfiz Aulia dan Rifky Alvan Aulia. Terimakasih atas segala dukungan, motivasi dan do'anya. Semoga Allah menjadikan kita sebagai anak yang sholih-sholihah dan selalu berbakti kepada orang tua.

Kepada Dosen-dosenku

Terimakasih telah memberikan banyak ilmu kepadaku, maafkanlah segala salahku, aku mengharap ridlomu sebagai seorang guru. Teruntuk Bapak Farid Samsu Hananto, M.T dan Ibu Umaiyatus Syarifah, M.A, terimakasih telah meluangkan banyak waktu untuk membimbingku.

Kepada Stirling Team

Terimakasih kepada Evita Muthiatul, Intan Putri Nazila dan Mas Ulin yang telah memberikan banyak motivasi serta aktif membantu penelitian ini.

Kepada teman-teman Fisika Angkatan 2012

Terimakasih kepada teman-teman fisika angkatan 2012 atas do'a dan dukungannya.

Kepada teman-teman kos Putri Ayu

Terimakasih kepada teman kos putri ayu atas do'a dan semangatnya, terkhusus kepada Nailatul Muna dan Chalimatus sya'diyah yang telah banyak memberikan semangat dan dukungannya.

KATA PENGANTAR



Assalamualaikum Wr. Wb

Syukur alhamdulillah kehadiran Allah Swt yang telah melimpahkan rahmat, taufiq serta hidaya-Nya. Sholawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada junjungan kita semua Baginda Rasullulah, Nabi besar Muhammad Saw serta para keluarga, sahabat, dan pengikut-pengikutnya. Atas ridho dan kehendak Allah Swt, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi yang berjudul “DESAIN DAN PEMBUATAN MESIN STIRLING DENGAN PEMANAS MATAHARI TIPE BOX SEBAGAI SUMBER ENERGI LISTRIK” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si).

Selanjutnya penulis haturkan ucapan terimakasih seiring do’a kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini. Ucapan terimakasih ini penulis sampaikan kepada:

1. Prof. Dr. H. Mudjia Raharjo, M.Si selaku rektor Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang, yang telah banyak memberikan pengetahuan dan pengalaman yang berharga.
2. Dr. drh. Bayyinatul Muchtaromah, M.Si selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Malana Malik Ibrahim Malang.
3. Erna Hastuti, M.Si selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim malang.
4. Farid Samsu Hananto, M.T selaku dosen pembimbing skripsi yang telah banyak memberikan pengarahan, kritik juga saran yang sangat berharga dan bermanfaat.
5. Umaiatus Syarifah, M.A seaku Dosen Pembimbing Agama, yang bersedia meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan pengarahan bidang integrasi Sains dan Al-Qur’an.
6. Segenap Dosen, Laboran dan Admin Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah bersedia mengamalkan ilmunya,

membimbing dan memberikan pengarahan serta membantu selama proses perkuliahan.

7. Kedua orang tua saya, Bapak Sudarsono dan Ibu Surati yang telah memberikan do'a, restu dan dukungan sehingga penulisan skripsi ini berjalan lancar, serta kedua adik saya Wizar Tanfiz Aulia dan Rifqy Alvan Aulia terimakasih atas semangat dan dukungan yang diberikan.
8. Teman-teman dan para sahabat dari Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang angkatan 2012 yang telah memberikan dukungan dan berbagi inspirasinya.
9. Semua pihak yang ikut membantu dalam menyelesaikan skripsi ini baik berupa materil maupun moril.

Penulis berharap semoga skripsi ini bisa memberikan manfaat, tambahan ilmu dan dapat menjadikan inspirasi kepada para pemaca *Amin Ya Rabbal Alamin*.
Wassalamu'alaikumWr. Wb.

Malang, 25 Agustus 2016



Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
مستخلص البحث	xvii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
BAB II KAJIAN PUSTAKA	
2.1 Matahari	6
2.2 Perpindahan Panas	7
2.2.1 Konduksi	7
2.2.2 Konveksi	9
2.2.3 Radiasi	11
2.3 Kaca dan Prinsip Pembiasan	14
2.4 Mesin Stirling	18
2.4.1 Siklus Mesin Stirling	18
2.4.2 Prinsip Kerja Mesin Stirling	19
2.5 Bagian-Bagian Mesin Stirling	23
2.5.1 Heat Exchanger	23
2.5.2 Piston	24
2.5.3 Displacer	25
2.5.4 Flayweel	25
2.5.5 Regenerator	26
2.6 Jenis-Jenis Mesin Stirling	27
2.6.1 Mesin Stirling Tipe Alfa	27
2.6.2 Mesin Stirling Tipe Beta	29
2.6.3 Mesin Stirling Tipe Gama	30
2.7 Parameter Unjuk Kerja Mesin Stirling	31
2.7.1 Torsi (Momen Gaya)	31
2.7.2 Kecepatan Sudut (rpm)	34
2.7.3 Daya (Power)	35

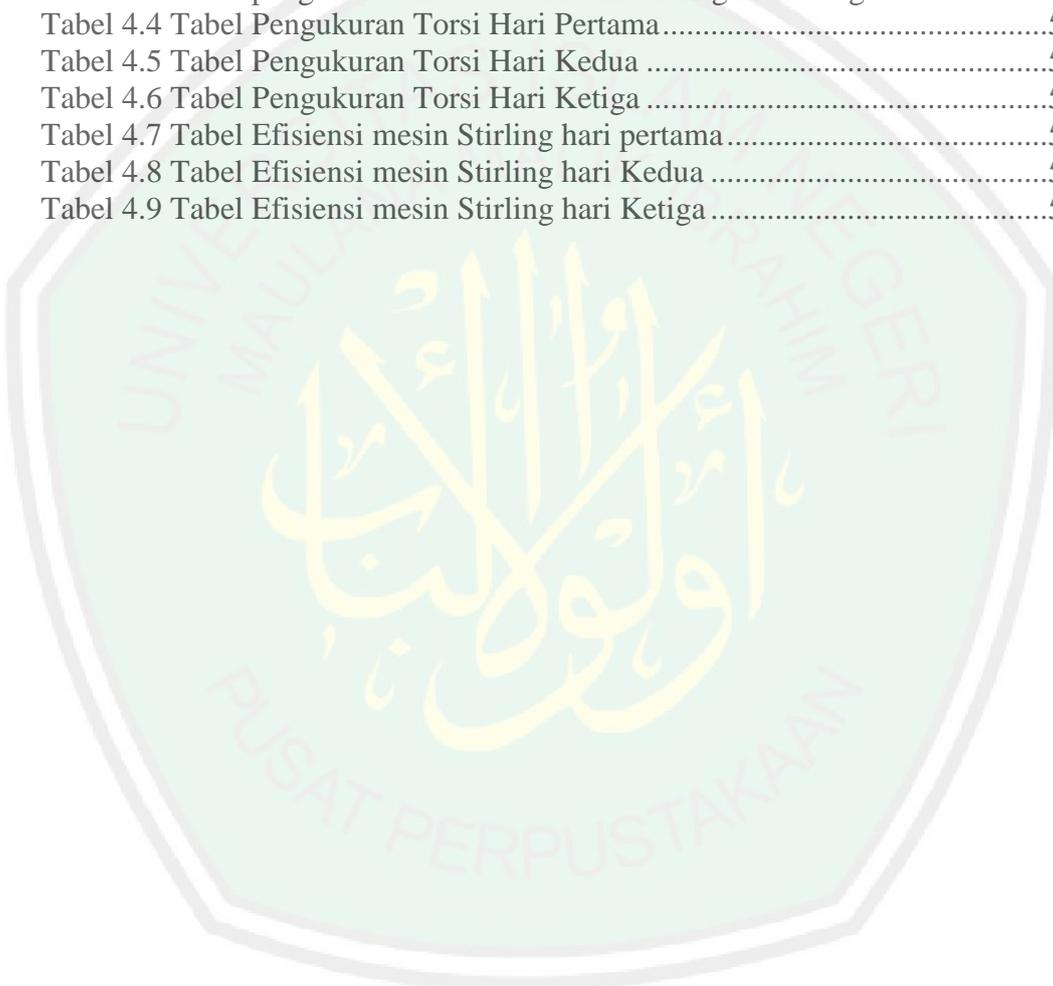
2.8 Kelebihan Mesin Stirling	36
2.9 Generator.....	37
2.9.1 Generator Arus Bolak-Balik (AC)	38
2.9.2 Generator Arus Searah (DC).....	39
BAB III METODE PENELITIAN	
3.1 Jenis Penelitian.....	41
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	41
3.3 Alat dan Bahan	41
3.4 Alur Percobaan.....	43
3.5 Desain Mesin Stirling Berbasis Matahari.....	43
3.6 Pemasangan Mesin Stirling Pada Pemanas Matahari Tipe Box	44
3.7 Pengujian Mesin Stirling Pada Pemanas Matahari Tipe Box	45
3.8 Pengambilan Data	46
3.9 Pengolahan Data.....	46
3.10 Analisis Hasil	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Prosedur Pengujian	48
4.2 Hasil Penelitian	49
4.2.1 Data Hasil Pengukuran Intensitas	49
4.2.2 Analisis Hubungan Antara Perubahan Suhu dengan Putaran	51
4.2.3 Analisis Hubungan Putaran dengan Torsi.....	53
4.2.4 Data Hasil Perhitungan Efisiensi	55
4.3 Pembahasan.....	57
BAB V PENUTUP	
5.1 kesimpulan	61
5.2 Saran.....	61
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Diagram P-V dan T-S.....	19
Gambar 2.2 Gambaran Umum Mesin Stirling	20
Gambar 2.2 Konsep Persamaan Siklus Mesin Stirling	21
Gambar 2.4 Heat Exchanger	24
Gambar 2.5 Piston Pada Tipe Gama Terpisah Dalam Ruang yang Berbeda	24
Gambar 2.6 Displacer Pada Mesin Stirling Tipe Beta	25
Gambar 2.7 Flywell Pada Mesin Stirling Tipe Beta dan Gama	26
Gambar 2.8 Regenerator yang Digunakan Pada Semua Tipe Mesin Stirling	27
Gambar 2.9 Skema Kerja Mesin Stirling Jenis Alpha	28
Gambar 2.10 Siklus Mesin Stirling Beta.....	29
Gambar 2.11 Mesin Stirling Tipe Gama	30
Gambar 2.12 Momen Gaya Menyebabkan Gerak Rotasi Benda	31
Gambar 2.13 Sudut Antara F dan r Menentukan Besarnya Torsi	33
Gambar 2.14 Prinsip Dinamometer	34
Gambar 2.15 Konstruksi Generator DC	39
Gambar 2.16 Prinsip Kerja Generator DC	40
Gambar 3.1 Alur Penelitian.....	43
Gambar 3.2 Bahan yang Digunakan dalam Pembuatan Box	45
Gambar 3.3 Pemasangan Mesin Stirling Pada Pemanas Tipe Box	45
Gambar 4.4 Grafik hubungan perubahan suhu dengan putaran hari ke-1.....	51
Gambar 4.5 Grafik hubungan perubahan suhu dengan putaran hari ke-2.....	52
Gambar 4.6 Grafik hubungan perubahan suhu dengan putaran hari ke-3.....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Konduktivitas termal untuk beberapa bahan.....	9
Tabel 2.2 Nilai koefisien Konveksi.....	10
Tabel 2.3 Transmisi cahaya dan panas pada beberapa bahan transparan	16
Tabel 3.1 Format Tabel Data Hasil Penelitian	43
Tabel 4.1 Tabel pengukuran Intensitas Mesin Stirling Hari Pertama	47
Tabel 4.2 Tabel pengukuran Intensitas Mesin Stirling Hari kedua.....	50
Tabel 4.3 Tabel pengukuran Intensitas Mesin Stirling Hari ketiga	50
Tabel 4.4 Tabel Pengukuran Torsi Hari Pertama.....	54
Tabel 4.5 Tabel Pengukuran Torsi Hari Kedua	54
Tabel 4.6 Tabel Pengukuran Torsi Hari Ketiga	54
Tabel 4.7 Tabel Efisiensi mesin Stirling hari pertama.....	55
Tabel 4.8 Tabel Efisiensi mesin Stirling hari Kedua	56
Tabel 4.9 Tabel Efisiensi mesin Stirling hari Ketiga.....	56



DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 Dokumentasi Penelitian
- Lampiran 2 Data Penelitian
- Lampiran 3 Hasil Perhitungan Penelitian



ABSTRAK

Alfianti, Zulfi Farida. 2016. **Desain dan Pembuatan Mesin Stirling Tenaga Matahari Dengan Memanfaatkan Pemanas Matahari Tipe Box Untuk Pembangkit Listrik**. Skripsi. Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing: (I) Farid Samsu Hananto, M.T (II) Umai'yatus Syarifah, M.A

Kata kunci: Mesin Stirling, Putaran motor, RPM, generator

Mesin Stirling merupakan suatu mesin kalor yang digerakkan melalui siklus kompresi dan ekspansi pada fluida kerja dalam wujud gas. Secara umum skema kerja mesin ini, pada suhu yang berbeda akan terjadi perbedaan tekanan yang dapat menimbulkan perubahan energi panas menjadi energi kerja mekanik. Dari energi kerja mekanik akan dilanjutkan ke energi listrik. Metode penelitian ini dilakukan secara eksperimental, yaitu untuk menguji desain mesin Stirling. Diameter displacer 10,5 cm, roda gila 12 cm, piston power 24,5 mm, piston displacer 10 cm, dan connecting rod 8 cm. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh intensitas matahari terhadap perbedaan suhu, pengaruh perbedaan suhu terhadap putaran dan efisiensi yang dihasilkan oleh mesin Stirling. Pada penelitian ini menggunakan generator DC dengan hambatan $11,4\Omega$. Efisiensi didapat dengan membandingkan kerja output dengan kalor input. Efisiensi paling tinggi yaitu 12,1% pada intensitas 834 W/m^2 dengan perbedaan suhu 120°C sehingga menghasilkan putaran 139 rpm dengan daya generator yang dihasilkan yaitu 0.004 Watt.

ABSTRACT

Alfianti, Zulfi Farida. 2016. **Designing and constructing of Solar Stirling Engine with Utilizing Solar Heating of Box type for electric generator**. Thesis. Department of Physics, Faculty of Science and Technology of the State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisor: (I) Farid Samsu Hananto, M.T (II) Umaiatus Syarifah, M.A.

Keywords: Stirling engine, the motor rotation, RPM, generator

The Stirling machine is a heat engine driven through a cycle of compression and expansion of the working fluid in the gas state. In general scheme of this machine, at different temperatures will occur pressure differences can lead to changes in heat energy into mechanical work energy. Energy from the mechanical work will continue into electrical energy. Methods of this study was carried out experimentally, which was to test the design of the Stirling machine. Displacer diameter of 10.5 cm, 12 cm of flywheel, piston power of 24.5 mm, 10 cm of displacer piston, and connecting rod of 8 cm. The purpose of this study was to determine the effect intensity of the sun to the temperature difference, the effect of the temperature difference of the rotation and the efficiencies generated by the stirling engine. In this study used a DC generator with 11,4 Ω barriers. Efficiency was obtained by comparing the work output with heat input. Highest efficiency was 12.1% at an intensity of 834 W / m² with a temperature difference of 120 ° C to produce a 139 rpm rotation with generator which was generated of 0.004 Watts

مستخلص البحث

ألفينتي، زلفي فريدة. ٢٠١٦. تصميم وتصنيع محرك ستيرلينغ الطاقة الشمسية مع التدفئة الاستفادة من الطاقة الشمسية نوع المربع لمحطات الطاقة الكهربائية. بحث جامعي. شعبة الفيزياء، كلية العلوم والتكنولوجيا في جامعة الإسلامية الحكومية مولانا مالك إبراهيم مالانج. المشرف: فريد سامسوهاننتو، الماجستير و أمية الشريفة، الماجستير

كلمات الرئيسية: محرك ستيرلينغ، دوران المحرك، دورة في الدقيقة، مولد كهربائي

محرك ستيرلينغ هو حرارة المحرك مدفوعة من خلال دائرة الضغط والتوسع في وسائل العمل في وجود الغاز. في المخطط العام لهذا الجهاز، عند درجات حرارة مختلفة ستحدث تحولات ضغط يمكن أن يؤدي إلى تغييرات في الطاقة الحرارية إلى طاقة العملية الميكانيكية. وسوف تستمر الطاقة من الأعمال الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. طرق أجريت هذه الدراسة تجريبيا، الذي هو لاختبار تصميم محرك ستيرلينغ. قطر المحل من ١٠.٥ سنتي متر، دولاب الموازنة يعني ١٢ سنتي متر، قوة المكبس ٢٤.٥ ميل لتر، المحل المكبس ١٠ سنتي متر، وربط قضيب ٨ سنتي متر. و اما الغرض من هذه الدراسة هو تحديد شدة تأثير الشمس إلى الفرق في درجة الحرارة، وتأثير اختلاف درجة الحرارة من التناوب والكفاءة الناتجة عن محرك ستيرلينغ. في هذه الدراسة باستخدام مولد العاصمة DC بجواجز $11,4\Omega$ يتم الحصول على كفاءة بمقارنة الناتج العمل مع المدخلات الحرارة. أعلى كفاءة 12,1% في كثافة من 834 W/m^2 مع وجود فرق درجة حرارة 120°C لإنتاج دوران ١٣٩ دورة في الدقيقة مع مولدات الطاقة المولدة هي 0.004 Watt.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehidupan manusia modern semakin tergantung kepada energi, sehingga kesejahteraan sangat ditentukan oleh jumlah dan mutu energi yang dimanfaatkan baik secara langsung maupun tidak langsung. Di samping itu, energi juga merupakan unsur penunjang yang amat penting dalam proses pertumbuhan ekonomi dan ikut menentukan keberhasilan pembangunan di sektor lain.

Pada dasarnya, semua bentuk energi di dunia ini berasal dari energi matahari. Minyak, batu bara, *natural gas*, dan kayu awalnya terbentuk oleh proses fotosintesis yang dilanjutkan dengan reaksi kimia yang sangat kompleks di mana terdapat proses membusuknya tumbuh-tumbuhan ke temperatur dan tekanan yang tinggi dalam periode waktu yang lama. Bahkan, energi angin dan pasang berasal dari energi matahari juga karena disebabkan adanya perbedaan temperatur di berbagai daerah bumi.

Bila ditinjau dari sumber pengadaan energi saat ini, sumber energi dunia masih banyak bergantung pada energi fosil. Dimana energi fosil tersebut tidak bisa diperbarui lagi dengan jumlahnya yang sangat terbatas dan semakin lama akan semakin habis. Menurut Christ Lewis dalam bukunya yang berjudul *Biological Fuels* memperkirakan bahwa gas alam akan habis pada tahun 2047, minyak bumi pada tahun 2080, dan batu bara pada tahun 2180. Hal ini disebabkan karena energi fosil dieksplorasi secara besar-besaran dan tidak sebanding dengan waktu pembentukan energi fosil tersebut.

Selama beberapa abad belakangan ini, energi fosil menyediakan hampir seluruh energi yang dibutuhkan. Hal ini dikarenakan energi fosil bersifat jauh lebih murah dibandingkan energi alternatif lainnya, seperti energi matahari. Keuntungan yang paling besar dalam pemanfaatan energi matahari dibandingkan dengan bentuk energi lainnya adalah energi matahari bersifat bersih dan bersifat terus-menerus tanpa adanya polusi terhadap lingkungan sedikitpun.

Matahari merupakan bintang yang paling dekat dengan bumi, yang memiliki jarak 150 juta Kilometer dari bumi. Menurut beberapa ahli fisika mengatakan bahwa sinar matahari adalah sumber utama energi untuk semua keperluan di bumi. Firman Allah Swt dalam surat An-Naba (78):13:

وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا ﴿١٣﴾

“Dan Kami jadikan pelita yang amat terang (matahari)” (QS. An-Naba (78): 13).

Istilah *wahhaj*, berasal dari kata dasar *wahaj*, berarti ‘cahaya dan panas’ yang berasal dari api. Kata dengan pengertian ‘terbakar dan terang’ digunakan untuk matahari, karena penjelasan sepanjang karunia besar yang menjadi penampak seluruh materi didunia ini, yakni cahaya dan panas. Cahaya matahari tidak hanya berfungsi untuk menyinari lingkungan sekitar manusia dan seluruh sistem tata surya, tetapi juga sangat efektif untuk pertumbuhan makhluk hidup. Sedangkan panas matahari, selain berakibat langsung pada kelangsungan hidup manusia, hewan, dan tumbuhan, ia juga menjadi penyebab keberadaan awan, angin, dan hujan yang dibutuhkan untuk membasahi tanah kering. Selain itu sinar ultraviolet yang terkandung dalam cahaya matahari sangat berguna untuk

membasmi kuman. Jika tidak demikian, generasi makhluk hidup akan lenyap dalam waktu singkat (Faqih, 2006: 129-130).

Matahari sebagai pelita berarti dipermukaan matahari terdapat sumber energi yang dapat dibakar (dinyalakan) sehingga energinya dapat dikirim sampai ke bumi. Energi matahari dikirim ke bumi dalam bentuk radiasi gelombang elektromagnetis yang sampai ke bumi dalam bentuk panas. Secara tradisional energi matahari telah sejak lama digunakan untuk menjemur pakaian, mengeringkan padi sebelum ditumbuk, mengawetkan bahan makanan dan lain sebagainya. Sekarang ini energi matahari juga digunakan sebagai sumber tenaga untuk baterai matahari atau *solar cell* (Wardhana, 2004: 102).

Negara Indonesia merupakan wilayah yang beriklim tropis yang terletak di bawah garis katulistiwa. Sehingga wilayah Indonesia memperoleh penyinaran sinar matahari sepanjang tahun, dengan hembusan angin yang terdapat di seluruh wilayah yang berada di bawah garis katulistiwa tersebut menjadi lintasan peredaran matahari.

Penelitian dan pengembangan di bidang sumber daya energi alternatif telah banyak dilakukan. Sistem energi alternatif dapat memberikan dampak yang menguntungkan terhadap lingkungan, ekonomi dan isu-isu politik di dunia. Keuntungan dari energi alternatif ini diantaranya adalah hemat energi, menumbuhkan lapangan pekerjaan, dan mengurangi polusi lingkungan.

Penggunaan energi alternatif juga memberikan manfaat terhadap penghematan konsumsi listrik atau diesel yang secara konvensional digunakan membangkitkan energi. Keuntungan ini juga berdampak langsung pada terhadap

pengurangan beban keuangan negara indonesia terhadap impor bahan bakar fosil. Keuntungan yang paling penting dalam sistem energi alternatif ini adalah pengurangan polusi lingkungan. Hal ini dicapai dari pengurangan emisi udara yang disebabkan oleh substitusi bahan bakar konvensional. Dampak terpenting dari polusi udara terhadap manusia dan lingkungan akan terlihat pada kesehatan umum, pertanian dan ekosistem.

Berdasarkan hal di atas, usaha untuk mengkonversi energi matahari sebagai sumber energi alternatif serta kepedulian terhadap pencemaran dan polusi lingkungan terpilihah pemanas matahari tipe *box* sebagai tugas akhir. Tugas akhir ini membahas tentang performa alat pengkonsentrasi radiasi sinar matahari untuk memanaskan fluida kerja yang berupa udara yang efektif dan efisien.

1.2 Rumusan Masalah

- a. Bagaimana pengaruh intensitas matahari terhadap kenaikan suhu pada mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.
- b. Bagaimana pengaruh perbedaan suhu terhadap putaran (rpm dan torsi) pada mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.
- c. Berapa besar efisiensi sistem yang dihasilkan oleh rancangan mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.

1.3 Tujuan Penelitian

- a. Bagaimana pengaruh intensitas matahari terhadap kenaikan suhu pada mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.
- b. Untuk mengetahui pengaruh perbedaan suhu terhadap putaran (rpm dan torsi) pada mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.
- c. Untuk mengetahui besar efisiensi sistem pada rancangan mesin stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan alternatif pemanfaatan energi panas matahari menjadi energi listrik yang bisa dimanfaatkan bagi kebutuhan masyarakat.

1.5 Batasan Masalah

1. Satuan daam penulisan skripsi menggunakan standar Satuan Internasional (SI).
2. Generator dan LED dalam ukuran kecil.
3. Tekanan pada mesin Stirling tidak diperhitungkan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Matahari

Matahari adalah benda langit yang berbentuk bola gas pijar yang maha besar, yang menyala dan amat panas, panasnya dapat mencapai 15 juta derajat celcius. Struktur matahari pada dasarnya terdiri: 1. Inti (*Core*); 2. Zona radiatif (*radiation zone*); 3. Zona konvektif (*convection zone*); 4. Fotosfer (*photosphere*); 5. Kromosfer (*chromosphere*); 6. Granulasi (*granulation*); 7. Filamen (*filament*); 8. Fakula (*facula*); 9. Spikul (*spicule*); 10. Noda hitam (*sunspot*); 11. Prominensa (*prominence*); dan 12. Korona (*corona*) (Dyayadi, 2008).

Sebagaimana diketahui ahli fisika bahwa sinar matahari adalah sumber utama energi untuk semua keperluan di bumi. Allah Swt berfirman dalam surat Nuh ayat (71): 16:

وَجَعَلَ الْقَمَرَ فِيهِنَّ نُورًا وَجَعَلَ الشَّمْسَ سِرَاجًا ﴿١٦﴾

“Dan Allah menciptakan padanya bulan sebagai cahaya dan menjadikan matahari sebagai pelita?” (QS.Nuh (71): 16).

Kata سراج mengisyaratkan adanya perbedaan antara matahari dan bulan. Matahari dijadikan pelita Allah Swt (bagaikan) pelita, yakni memiliki pada dirinya sendiri sumber cahaya, sedang bulan tidak dijadikannya (bagaikan) pelita kendati ia bercahaya. Ini berarti bulan bukanlah planet yang memiliki cahaya pada dirinya sendiri tetapi ia memantulkan cahaya, berbeda dengan matahari (Shihab, 2003:467).

Menurut al-Qarni (2008:435) Allah Swt juga menjadikan bulan dilangit sebagai cahaya bagi penduduk bumi, mereka memanfaatkan pantulan cahayanya dalam kegelapan. Ini merupakan bukti keindahan bentuk dan sistemnya. Sedangkan Allah Swt menjadikan matahari sebagai lampu terang yang menyinari seluruh alam ini dengan sinarnya.

Allah Swt tidak menciptakan matahari dan bulan kecuali karena adanya satu hikmah yang agung dan pertanda yang jelas tentang keindahan ciptaan-Nya dan keagungan mahakarya-Nya. Allah Swt menjelaskan bukti-bukti bagi kaum yang mengetahui tujuan-tujuan penciptaan dan pembentangan ayat-ayat tersebut (Al-Qarni, 2007).

2.2 Perpindahan Panas

Bila dua benda atau lebih terjadi kontak termal maka akan terjadi aliran kalor dari benda yang bertemperatur lebih tinggi ke benda yang bertemperatur lebih rendah, hingga tercapainya kesetimbangan termal. Proses perpindahan panas ini berlangsung dalam 3 mekanisme, yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi.

2.2.1 Konduksi

Konduksi adalah satu-satunya mekanisme dimana panas dapat mengalir dalam zat padat yang tidak dapat tembus cahaya. Konduksi penting dalam fluida, tetapi di dalam medium yang bukan padat biasanya bergabung dengan konveksi, dan radiasi.

Energi berpindah secara konduksi (*conduction*) atau hantaran dan laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal (Giancoli, 2001):

$$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

Pada umumnya, bahan yang dapat menghantarkan arus listrik dengan sempurna (logam) merupakan penghantar yang baik juga untuk kalor dan sebaliknya. Selanjutnya bila diandaikan sebatang besi atau sembarang jenis logam dan salah satu ujungnya di ulurkan ke dalam nyala api dapat diperhatikan bagaimana kalor dipindahkan dari ujung yang panas ke ujung yang dingin. Apabila ujung batang logam tadi menerima energi kalor dari api, energi ini akan memindahkan sebagian energi kepada molekul dan elektron yang membangun bahan tersebut. Molekul dan elektron merupakan alat pengangkut kalor di dalam bahan menurut proses perpindahan kalor di dalam bahan, aliran elektron akan memainkan peranan penting (Koestur, 2001).

Laju perpindahan panas konduksi dapat dinyatakan dengan Hukum Fourier sebagai berikut (Koestur, 2002):

$$q = -KA \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (2.2)$$

Dimana: q = Laju perpindahan panas (W)

K = Konduktivitas Termal (W / (m.K))

A = Luas penampang yang terletak pada aliran panas (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur dalam arah aliran panas (k/m)

Tanda minus (-) digunakan untuk menunjukkan bahwa arah perpindahan kalor bergerak dari daerah yang bertemperatur tinggi menuju daerah bertemperatur rendah.

Dari persamaan 2.2 dapat dilihat bahwa besarnya laju perpindahan kalor juga ditentukan oleh Konduktivitas termal (K) dari suatu bahan. Berikut adalah Konduktivitas termal untuk beberapa bahan pada 0°C (Giancoli, 2001: 502):

Tabel 2.1 Konduktivitas termal untuk beberapa bahan (Giancoli, 2001: 502).

Bahan	Konduktivitas termal, k	
	Kkal/smC	J/smC
Perak	10×10^{-2}	420
Tembaga	$9,2 \times 10^{-2}$	380
Aluminium	$5,0 \times 10^{-2}$	202
Baja	$1,1 \times 10^{-2}$	40
Es	4×10^{-4}	2
Gelas	$2,0 \times 10^{-4}$	0,84
Batu bata	$2,0 \times 10^{-4}$	0,84
Air	$1,4 \times 10^{-4}$	0,2
Kayu	$0,5 \times 10^{-4}$	0,08 – 0,16
Isolator fibreglass	$0,2-0,4 \times 10^{-4}$	0,048
Gabus	$0,12 \times 10^{-4}$	0,042
Wol	$0,1 \times 10^{-4}$	0,040
Udara	$0,055 \times 10^{-4}$	0,023

2.2.2 Konveksi

Konveksi adalah proses dimana kalor di transfer dengan pergerakan molekul dari satu tempat ke tempat yang lain (Giancoli, 2001: 54). Pada umumnya laju perpindahan panas dapat dinyatakan dengan hukum persamaan pendinginan Newton sebagai berikut (Koestur, 2002):

$$Q = h A (T_w - T_\infty) \quad (2.3)$$

Dimana: Q = Laju perpindahan panas (Watt)

h = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \text{ } ^\circ C$)

A = Luasan perpindahan panas arah normal Q (m^2)

T_w = Temperatur permukaan benda ($^\circ C$)

T_∞ = Temperatur fluida ($^\circ C$)

Dengan kata lain, besarnya panas yang dialirkan per satuan waktu tergantung pada luas permukaan, selisih suhu, dan juga koefisien konveksi zat tersebut yang menjadi kekhasan suatu zat (Suparno, 2009: 69).

Sebuah contoh yang lazim ialah konveksi alamiah dari dinding atau dari pipa yang suhunya konstan dan dikelilingi oleh udara luar yang beda suhunya dengan dinding atau pipa itu sebesar ΔT . Koefisien konveksi yang dapat dipakai dalam situasi ini tercantum dalam tabel berikut (Zemansky, 1986):

Tabel 2.2 Nilai Koefisien konveksi (Zemansky, 1986)

Alat	Koefisien konveksi h , $kal \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} (\text{C}^\circ)^{-1}$
Pelat horizontal, menghadap ke atas	$0.595 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Pelat horizontal, menghadap ke bawah	$0.314 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Pelat vertikal	$0.424 \times 10^{-4} (\Delta T)^{1/4}$
Pipa horizontal atau vertikal dengan diameter (d)	$100 \times 10^{-4} (\frac{\Delta T}{d})^{1/4}$

Ada dua mekanisme perpindahan panas secara konveksi ini, yaitu:

1. konveksi alamiah (*Natural Convection*)

Perpindahan panas konveksi yang terjadi karena pengaruh gaya apung (*bouyance effect*) yang disebabkan perbedaan *density* pada beberapa variasi temperatur fluida.

2. konveksi paksa (*Forced Convection*)

Perpindahan panas konveksi yang terjadi karena adanya pengaruh gaya luar yang bekerja, misalkan pompa, *blower*, *fan*, dan lain sebagainya. Perbedaan temperatur antara permukaan benda dan aliran fluida menimbulkan suatu daerah yang mempunyai variasi temperatur dari T_s pada $y = 0$ ke w pada aliran paling luar. Daerah ini disebut lapisan batas termal (Cengel,2002:26).

2.2.3 Radiasi

Radiasi adalah proses perpindahan panas melalui gelombang elektromagnetik atau paket-paket energi (*photon*) yang dapat dibawa sampai pada jarak yang sangat jauh tanpa memerlukan interaksi dengan medium (ini yang menyebabkan mengapa perpindahan panas radiasi sangat penting pada ruang vakum), disamping itu jumlah energi yang dipancarkan sebanding dengan temperatur benda tersebut. Kedua hal tersebut yang membedakan antara peristiwa perpindahan panas konduksi dan konveksi dengan perpindahan panas radiasi (koester, 20002: 183)

Tidak seluruh energi yang disebutkan dalam konstanta surya mencapai permukaan bumi, karena terdapat absorpsi yang kuat dari karbondioksida dan uap air di atmosfer. Radiasi surya yang menimpa permukaan bumi juga bergantung

dari kadar debu dan zat pencemar lainnya dalam atmosfer. Energi surya yang maksimal akan mencapai permukaan bumi bilamana berkas sinar itu langsung menimpa permukaan bumi karena:

- a. terdapat bidang pandang yang lebih luas terhadap fluks surya yang datang
- b. berkas sinar surya menempuh jarak yang lebih pendek di atmosfer, sehingga mengalami absorpsi lebih sedikit dari pada sudut tumpunya miring terhadap normal (Holman, 1994: 422).

Radiasi elektromagnetik terdiri dari beberapa jenis, dimana radiasi termal cahaya (3×10^{10} m/s). Kecepatan ini sama dengan hasil perkalian antara panjang gelombang dengan frekuensi radiasi (Koester, 2002: 184):

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.4)$$

dimana:

- c = kecepatan cahaya (m/s)
- λ = panjang gelombang (mm)
- ν = frekuensi (Hz)

Radiasi termal adalah proses perpindahan panas melalui paket-paket energi yang disebut photon (kuantum), dimana menurut postulat Plank setiap kuantum mengandung energi sebesar (Koester, 2002: 184):

$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \quad (2.5)$$

Setiap kuantum dapat kita anggap sebagai partikel yang mempunyai energi, massa dan momentum, seperti halnya gas. Jadi pada hakikatnya, radiasi dapat

digambarkan sebagai “gas photon” yang dapat mengalir dari suatu tempat ke tempat lain. Dengan menggunakan hubungan relativistic antara massa dan energi, kita turunkan suatu persamaan untuk massa dan energi dari “partikel” tersebut (Koester,2002: 184):

$$E = mc^2 = h \nu \quad (2.6)$$

$$m = h \nu / c^2 \quad (2.7)$$

$$\text{momentum} = c (h\nu / c^2) = h \nu / c \quad (2.8)$$

dimana: h = konstanta planck
 c = kecepatan cahaya

Faktor-faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi matahari di bumi antara lain (Ardiani, 2005: 16):

1. Sudut datang sinar matahari, sinar datang tegak lurus memberikan energi sinar yang lebih besar dibanding yang datangnya condong, karena sinar datang tegak lurus akan menyinari wilayah yang lebih sempit dibandingkan sinar yang condong.
2. Panjang hari, bergantung pada musim dan letak lintang suatu tempat.
3. Pengaruh atmosfer, kejernihan atmosfer memberikan energi radiasi yang kuat, semakin banyak bahan penyerap sinar di atmosfer energi radiasi semakin turun.

Radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi disebut insolation (*incoming solar radiation*) yang terdiri dari radiasi langsung (*direct radiation*) dan radiasi baur (*difusse radiation*). Dari seluruh radiasi yang datang hanya *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) yang dapat dimanfaatkan tanaman.

Kisaran radiasi PAR mendekati radiasi sinar tampak. Energi radiasi yang datang di permukaan atmosfer selama satu tahun disebut tetapan radiasi surya (*solar constant*) yang besarnya sekitar 1.360 W/m^2 (Usmadi, 2006).

2.3 Kaca dan Prinsip Pembiasan

Pembiasan cahaya atau refraksi cahaya adalah pembelokan cahaya ketika berkas cahaya melewati bidang batas dua medium yang berbeda indeks biasnya. Indeks bias mutlak suatu bahan adalah perbandingan kecepatan cahaya di ruang hampa dengan kecepatan cahaya di bahan tersebut. indeks bias relatif merupakan perbandingan indeks bias dua medium berbeda. Indeks bias relatif medium kedua terhadap medium pertama adalah perbandingan indeks bias antara medium kedua dengan indeks bias medium pertama. Pembiasan cahaya menyebabkan kedalaman semu dan pemantulan sempurna.

Gelombang yang ditransmisikan adalah hasil interferensi dari gelombang datang dan gelombang yang dihasilkan oleh penyerapan dan radiasi ulang energi cahaya oleh atom-atom dalam medium tersebut. Untuk cahaya memasuki kaca dari udara, ada sebuah ketertinggalan fase (*phase lag*) antara gelombang yang diradiasikan kembali dan gelombang datang. Demikian juga ada ketertinggalan fase antara gelombang hasil (*resultan*) dan gelombang datang. Ketertinggalan fase ini berarti bahwa posisi puncak gelombang dari gelombang yang dilewatkan diperlambat relatif terhadap posisi puncak gelombang dari gelombang yang dilewatkan diperlambat relatif terhadap posisi puncak gelombang dari gelombang datang di dalam medium tersebut. Jadi, pada waktunya, gelombang yang dilewatkan tidak berjalan di dalam medium sejauh gelombang datang aslinya. Jadi

kecepatan gelombang yang dilewatkan lebih kecil dari kecepatan gelombang datang. Indeks bias, yaitu perbandingan laju cahaya di ruang hampa terhadap laju cahaya di dalam medium, selalu lebih besar dari 1. Sebagai contoh, laju cahaya di dalam kaca kira-kira dua per tiga dari laju cahaya di ruang bebas. Jadi indeks bias kaca kira-kira $n = \frac{c}{v} = \frac{3}{2}$ (Tipler, 2001: 446).

Peristiwa pembiasan pada bidang batas antara dua medium memenuhi hukum Snellius sebagai berikut:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (2.9)$$

keterangan: n_1 = indeks bias medium tempat cahaya datang

θ_1 = sudut datang

n_2 = indeks bias medium tempat cahaya bias

θ_2 = sudut bias

Lapisan transparan memungkinkan radiasi gelombang pendek dari matahari masuk dan radiasi gelombang panjang yang dihasilkan tersebut keluar sehingga mengakibatkan suhu di dalam bangunan lebih tinggi dari suhu lingkungan. Efek inilah yang disebut dengan efek rumah kaca. Untuk itu lapisan rumah kaca yang merupakan lapisan transparan memerlukan bahan yang mempunyai daya tembus (*transmissivity*) yang tinggi dengan daya serap (*absorpsivity*) dan daya pantul (*reflectivity*) yang rendah sehingga menyebabkan efek pemanasan setinggi mungkin (Abdullah, 1998). Tabel berikut menyajikan karakteristik beberapa bahan tembus cahaya sebagai lapisan transparan.

Tabel 2.3 Transmisi Cahaya dan Panas Pada Bahan Transparan (Abdullah,1998):

Jenis Bahan	Transmisi Cahaya (%)	Transmisi Panas (%)
Udara	100	100
Kaca (<i>double strength</i>)	90	88
Polycarbonate	84,4	
FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)	89,95	
<i>Polyethylene</i>		
1. Satu Lapis	88	
2. Dua Lapis	81	
3. Dengan (3/6 ruang udara)	85	
<i>Fiberglass</i>		
1. Bening (<i>Clear</i>)	92 - 95	63 – 68
2. Warna jade	81	61 – 68
3. kuning	64	37 – 43
4. Putih Salju	63	30 – 34
5. Hijau	62	60 – 68
6. Merah kekuningan (<i>cord</i>)	61	57 – 66
7. Jernih (<i>canary</i>)	25	20 – 23

Sifat gas rumah kaca adalah menaikkan suhu bumi dengan cara menangkap radiasi gelombang pendek dari matahari dan memantulkan ke bumi. Gas rumah kaca juga memantulkan radiasi gelombang panjang ke bumi, sehingga bumi seakan-akan mendapatkan pemanasan dua kali. Dampak dari gas rumah kaca adalah pemanasan global dan efek rumah kaca. Sedangkan dampak turunan dari pemanasan global salah satunya adalah perubahan iklim. Naiknya suhu rata-rata bumi adalah salah satu bukti telah terjadi perubahan iklim. Pemanasan global ini pun mendapatkan radiasi matahari tambahan lagi karena terdapatnya lubang

ozon. Penipisan ozon mengakibatkan radiasi sinar ultraviolet dari matahari yang masuk ke bumi semakin besar intensitasnya (Trismidianto: 2009).

Istilah efek rumah kaca, diambil dari cara tanam yang digunakan para petani di daerah iklim sedang (negara yang memiliki empat musim). Para petani biasa menanam sayuran atau bunga di dalam rumah kaca atau untuk menjaga suhu ruangan tetap hangat. Dari sinar yang masuk tersebut akan dipantulkan kembali oleh benda atau permukaan dalam rumah kaca, ketika dipantulkan sinar itu berubah menjadi energi panas yang berupa sinar inframerah, selanjutnya energi panas tersebut terperangkap dalam rumah kaca. Demikian pula halnya salah satu fungsi atmosfer bumi kita seperti rumah kaca tersebut (Haneda, 2004).

Berdasarkan bahan atap dan dindingnya, *greenhouse* dibedakan atas *greenhouse* kaca dan plastik. Penggunaan kaca untuk atap maupun dinding *greenhouse* mempunyai beberapa kelebihan, seperti mampu menembus cahaya matahari yang diterimanya dalam prosentase yang cukup tinggi. Dari 100% sinar matahari yang diterima kaca bagian terbesar diteruskan (90-92%) dan sebagian di pantulkan (8-10) dengan ketebalan rata-rata 2-5 mm (Widyastuti, 1993).

2.4 Mesin Stirling

2.4.1 Siklus Mesin Stirling

Mesin stirling beroperasi melalui penggunaan sumber panas eksternal dan sumber dingin eksternal, masing-masing dijaga agar memiliki perbedaan temperatur yang cukup besar. Proses peredaran termodinamika terdiri dari dua jenis proses, yaitu (Cronenberg,2005):

1. Irreversible process

Adalah proses termodinamik yang berlangsung secara alami seluruhnya. Proses tersebut berlangsung secara spontan dalam satu arah tapi tidak pada arah sebaliknya. Contoh kalor berpindah dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah.

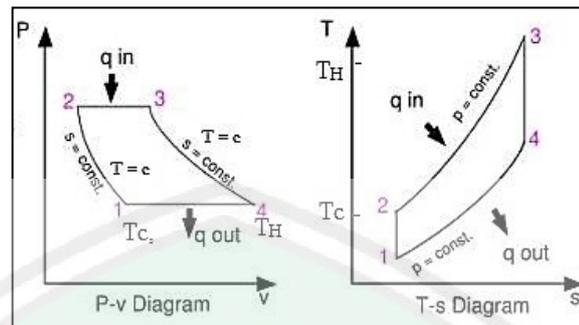
2. *Reversibel process*

Adalah proses termodinamik yang dapat berlangsung secara bolak-balik. Sebuah sistem yang mengalami idealisasi, proses reversibel selalu mendekati keadaan kesetimbangan termodinamik antara sistem itu sendiri dengan lingkungannya. Proses reversibel merupakan proses seperti keseimbangan (Q_1).

3. *Quasi equilibrium process*

Siklus stirling menggunakan generator diperlihatkan pada diagram p-v dan T-s pada gambar 2.1. Siklus tersebut terdiri dari empat proses yang reversibel secara internal (Michel J. Moran, 2003:108-109).

Regenerator yang memiliki nilai keefektifan 100% mengijinkan kalor yang terbuang selama proses 4-1 digunakan sebagai masukan kalor di dalam proses 2-3. Oleh sebab itu, proses penambahan kalor secara eksternal ke dalam fluida kerja terjadi di dalam proses isothermal 1-2. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa nilai efisiensi termal pada stirling diberikan melalui persamaan yang sama seperti yang digunakan pada siklus Carnot maupun Ericsson.



Gambar 2.1 Diagram P-v dan T-s

Mesin Stirling menawarkan peluang-peluang untuk mencapai efisiensi tinggi bersama dengan pengurangan emisi dari produk hasil pembakaran, karena pembakaran terjadi secara eksternal dan bukan di dalam silinder seperti pada motor pembakaran dalam. Di dalam mesin Stirling, energi dipindahkan ke dalam fluida kerja dari produk hasil pembakaran yang dijaga terpisah. Mesin ini merupakan mesin pembakaran luar (Michel J. Moran, 2003:108-109).

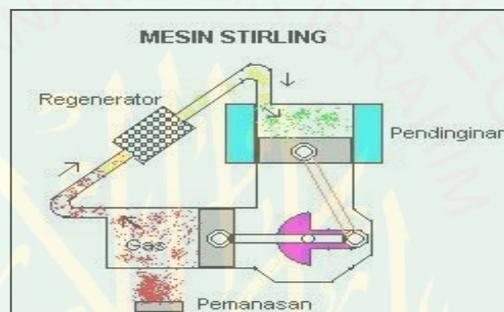
2.4.2 Prinsip Kerja Mesin Stirling

Mesin Stirling adalah sebuah mesin panas yang beroperasi secara kompresi siklik (berulang-ulang) dengan melalui pemuaihan udara atau gas (gaya fluida) pada tingkat suhu yang berbeda sehingga ada konversi energi panas menjadi energi mekanik (termodinamika).

Seperti mesin uap, mesin stirling secara tradisional diklasifikasikan sebagai mesin pembakaran eksternal. Seperti transfer panas dari tabung pembakaran (tabung yang dibakar dari luar). Berbeda dengan mesin pembakaran internal, dimana masukan panas didapatkan dari pembakaran bahan bakar didalam tabung pembakaran. Mesin uap (*siklus Rankine Engine*) menggunakan zat cair dan

gas, untuk menghasilkan gaya mekanik. Mesin stirling didesain sedemikian rupa agar jumlah gas tetap secara permanen.

Mesin Stirling didefinisikan sebagai mesin regenerasi udara panas siklus tertutup. Dalam konteks ini, siklus tertutup berarti bahwa fluida kerjanya secara permanen terkurung di dalam sistem. Mesin Stirling disebut juga mesin udara dengan model mesin pembakaran luar siklus tertutup.

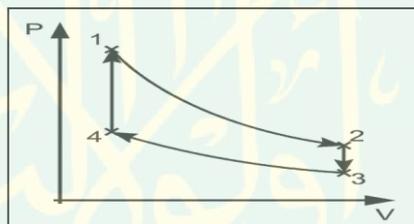


Gambar 2.2 Gambaran umum Mesin Stirling (Walker G: 1965)

Mesin Stirling bekerja karena adanya ekspansi gas ketika dipanaskan dan diikuti kompresi gas ketika didinginkan. Mesin itu berisi sejumlah gas yang dipindahkan antara sisi dingin dan panas terus-menerus. Perpindahan gas ini dimungkinkan karena adanya piston displacer yang memindahkan gas antara dua sisi dan piston power mengubah volume internal karena ekspansi dan kontraksi gas. Piston yang berpindah disebut sebagai regenerator yang dapat membangkitkan kembali udara.

Prinsip kerja mesin stirling adalah memanfaatkan adanya perubahan tekanan dan volume pada gas dalam sistem tertutup. Gas pada sistem dikontakan pada reservoir panas sehingga sistem menyerap panas. Panas yang dihasilkan disimpan di dalam sebuah regenerator. Akibat adanya panas ini menyebabkan volume gas

bertambah, karena sistem dalam keadaan tertutup maka tidak ada gas yang keluar sehingga penambahan volume gas karena pemanasan menimbulkan perubahan tekanan yang cukup besar. Tekanan yang dihasilkan ini kemudian digunakan untuk menggerakkan piston. Sementara itu gas penggerak menyusup ke ruangan yang dingin, dengan melepas panas pada saat bersamaan. Karena penurunan suhu ini volume gas berkurang dan sistem menerima kerja kompresi yang menyebabkan volume gas kembali ke keadaan awal. Keadaan tersebut terjadi berulang secara periodik sehingga terjadi gerakan piston yang dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik dengan menghubungkannya ke turbin.



Gambar 2.3 Konsep persamaan siklus Mesin Stirling (Walker G: 1965)

Siklus Stirling terdiri atas empat tahap termodinamika antara lain:

1. Proses 1-2, Isotermal ekspansi

Udara berekspansi secara isotermal, pada temperatur konstan T_1 dari v_1 ke v_2 . Kalor yang diberikan sumber eksternal diserap selama proses.

Kerja yang dilakukan selama proses 1-2:

$$W_{1-2} = \int_{v_1}^{v_2} p \, dv = mRT \ln \frac{v_2}{v_1}$$

2. Proses 2-3, Isokhorik ekspansi

Udara lewat melalui regenerator dan didinginkan pada volume konstan ke temperatur T_3 . Pada proses ini kalor dibuang ke generator.

Kerja yang dilakukan selama proses 2-3:

$$W_{2-3} = - \int_2^3 p \, dv$$

$$W_{2-3} = - mc_v \int_{T_2}^{T_3} dT$$

$$W_{2-3} = - mc_v (T_2 - T_3)$$

$$W_{2-3} = mc_v (T_3 - T_2)$$

3. Proses 3-4, Isotermal kompresi

Udara dikompresi secara isotermal di dalam tabung dari V_3 ke V_4 . Pada proses ini kalor dibuang oleh udara.

Kerja yang dilakukan selama proses 3-4:

$$W_{3-4} = \int_{V_3}^{V_4} p \, dv = mRT \ln \frac{V_4}{V_3}$$

4. Proses 4-1, Isokhorik kompresi

Udara dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_1 dengan melewati udara ke regenerator dalam arah yang berlawanan dengan proses 2-3.

Pada proses ini kalor diserap oleh udara dari regenerator.

Kerja yang dilakukan selama proses 4-1:

$$W_{4-1} = - \int_4^1 p \, dv$$

$$W_{4-1} = - mc_v \int_{T_4}^{T_1} dT$$

$$W_{4-1} = - mc_v (T_4 - T_1)$$

$$W_{4-1} = -mc_v(T_3 - T_2)$$

Sehingga kerja total sistem adalah:

$$W_{\text{total}} = W_{1-2} + W_{2-3} + W_{3-4} + W_{4-1}$$

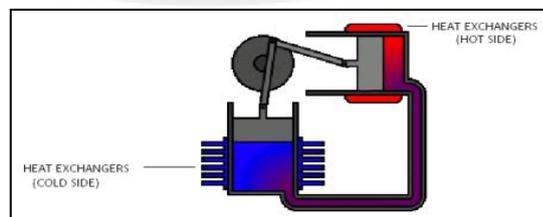
$$W_{\text{total}} = mRT \ln \frac{v_2}{v_1} + mc_v(T_3 - T_2) + mRT \ln \frac{v_4}{v_3} - mc_v(T_3 - T_2)$$

$$W_{\text{total}} = mRT_{12} \ln \frac{v_2}{v_1} + mRT_{34} \ln \frac{v_4}{v_3}$$

2.5 Bagian-bagian Mesin Stirling

2.5.1 Heat Exchanger

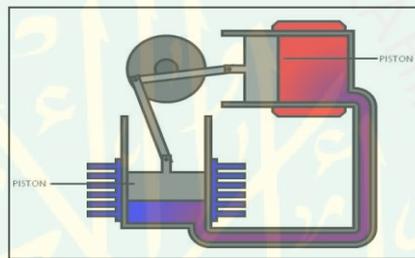
Silinder dari mesin stirling dijaga suhu (panas) sementara bagian lainnya tetap dijaga pada suhu rendah (dingin). Penukar panas yang digunakan untuk mencapai hal ini yaitu perangkat yang membantu dalam pertukaran panas dari satu medium ke medium lainnya. Di penghujung panas, panas dari sumber ditransfer ke silinder. Sementara di penghujung dingin, panas dari silinder ditransfer ke atmosfer. Mesin Stirling yang langsung dipanaskan tidak memiliki penukar panas yang signifikan. Udara dingin mesin Stirling biasanya memiliki penukar panas sederhana sementara pada air dingin mesin Stirling yang memiliki penukar panas yang lebih kompleks.



Gambar 2.4 Heat exchanger (Walker G: 1965)

2.5.2 Piston

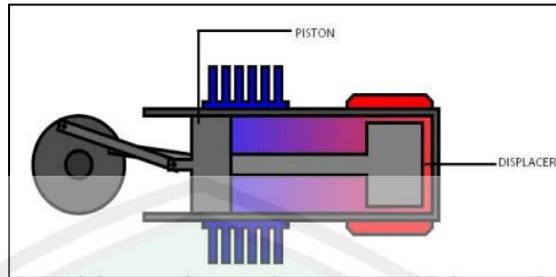
Piston adalah anggota geser yang dapat bergerak dari satu ujung ekstrim dari silinder ke ujung ekstrim yang lain, biasa disebut sebagai pusat mati. Biasanya gerakan volume piston dalam silinder bervariasi dan fluida kerja tidak melarikan diri melalui *clearance* antara piston dan antarmuka silinder. Piston dari mesin Stirling identik dengan yang ada di mesin mobil. Maka, tekanan gas yang bekerja pada piston diturunkan sebagai output kerja mesin.



Gambar 2.5 Piston pada tipe gama terpisah dalam ruang yang berbeda (Walker G: 1965)

2.5.3 Displacer

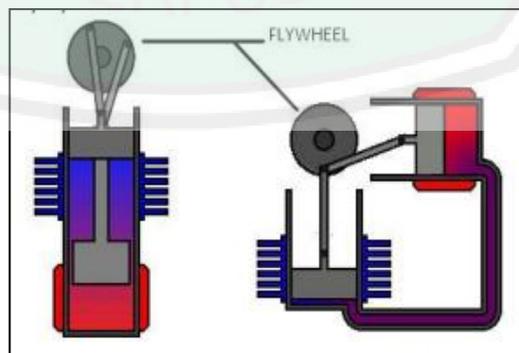
Displacer adalah bagian dari mesin Stirling yang bergeser geser menyerupai piston, tapi displacer silindernya jauh lebih besar. Hal ini memungkinkan fluida kerja mengalir dengan mudah melalui ruang. Seperti yang dapat kita bayangkan, pergerakan displacer tidak menyebabkan kompresi gas atau menyebabkan gas lebih luas (ekspansi), maka pergerakan displacer tidak menyebabkan volume silinder berubah dan gaya tekanan gas yang bekerja pada displacer akan diabaikan apabila dibandingkan dengan piston karena kebanyakan gas keluar melalui ruang ke sisi tekanan rendah.



Gambar 2.6 Displacer pada mesin stirling tipe beta (Walker G: 1965)

2.5.4 Flywheel

Roda gila (*Flywheel*) adalah massa inersia, dimana piston dan displacer (jika ada) digabungkan. Seperti yang kita ketahui hanya ada satu kekuatan dan selama bergerak roda gila mendapat beberapa energi sebagai energi kinetik rotasi, akibatnya kecepatan roda gila akan bertambah. Pada saat semua energi gerak dari roda gila digunakan maka kecepatannya turun. Hingga roda gila mengurangi fluktuasi kecepatan mesin dan ini juga memberikan daya untuk gerak lainnya. Output daya mesin diambil melalui roda gila, yang berarti mekanisme tepat digabungkan dengan roda gila untuk memanfaatkan kerja yang dihasilkan. Beberapa jenis mesin stirling tidak memiliki roda gila.



Gambar 2.7 *Flywheel* pada mesin stirling tipe beta dan gama. (Walker G: 1965)

2.5.5 Regenerator

Regenerator adalah salah satu bagian yang paling penting dari mesin Stirling. Regenerator pada dasarnya hanyalah sebuah penukar panas. Kebanyakan penukar panas pada umumnya arah aliran panas yang terjadi adalah konstan atau searah. Fluida dingin dan panas selalu mengalir dalam arah yang tetap dan mengalir secara berlanjut. Tapi dalam kasus regenerator, aliran panas hanya terjadi sebentar, ketika regenerator dingin cairan panas dilewatkan di atasnya. Hal ini menyebabkan semakin memanasnya regenerator dan mendinginkan fluida panas. Kemudian cairan dingin melewati regenerator yang pada saat itu suhu yang lebih tinggi dan panas dipindahkan dari regenerator ke fluida.



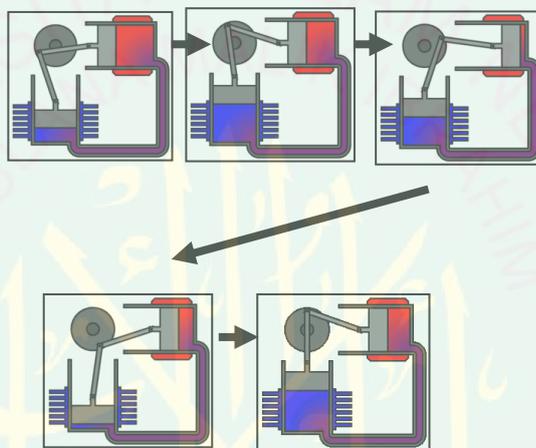
Gambar 2.8 Regenerator yang digunakan pada semua tipe mesin stirlng
(Walker G: 1965)

2.6 Jenis-jenis Mesin Stirling

2.6.1 Mesin Stirling Tipe Alfa

Mesin Stirling alfa berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada pada bagian dingin dan satunya berada di bagian panas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam displacer suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio

power-to-volume tinggi, namun memiliki masalah teknis karena apabila suhu piston tinggi biasanya panas akan merambat ke pipa pemisah silinder. Dalam prakteknya, piston ini biasanya membawa isolasi yang cukup besar untuk bergerak jauh dari zona panas dengan mengorbankan beberapa ruang tambahan (Reynold, 1991).



Gambar 2.9 Skema kerja Mesin Stirling jenis Alpha (Reynold, 1991)

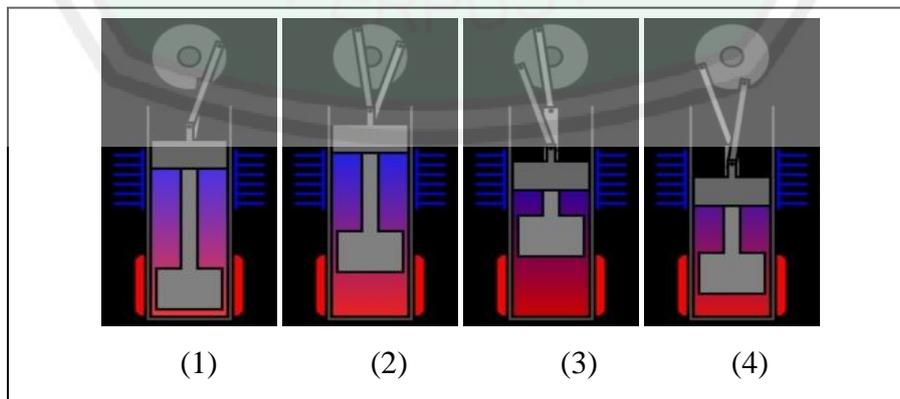
Siklus Kerja Mesin Stirling Alfa:

1. Sebagian besar gas berkerja dalam silinder panas yang telah dipanaskan melalui dinding silinder panas dan mendorong piston panas ke bagian bawah dengan menarik udara dari bagian piston dingin. Pada titik 90° adalah titik balik dimana piston panas akan menjadi sebuah siklus Mesin Stirling
2. Apabila gas pada volume maksimal, piston didalam silinder panas mulai bergerak, dan sebagian besar gas panas masuk ke dalam silinder dingin, di mana terjadinya proses pendinginan dan penurunan tekanan.

3. Hampir semua gas berada di silinder dingin dan proses pendinginan berlanjut. Piston dingin, didukung oleh momentum roda gila (pasangan piston lain pada poros yang sama) terjadi kompresi pada bagian gas yang tersisa.
4. Gas pada silinder dingin mencapai volume minimum, dan sekarang akan masuk ke dalam silinder panas di mana gas ini akan dipanaskan sekali lagi, dan memberikan kekuatan pada piston untuk mendorong piston panas.

2.6.2 Mesin Stirling Tipe Beta

Mesin Stirling beta memiliki piston daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai displacer piston. Silinder Piston displacer yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Ketika silinder dipanaskan gas mendorong dan memberikan piston kekuatan. Ketika piston terdorong ke dingin (titik bawah) silinder mendapat momentum dari mesin dan ditingkatkan dengan roda gila. Tidak seperti jenis Alfa, jenis beta tidak akan menyebabkan isolator (pipa pemisah jika dalam bentuk Alpha) menjadi panas.



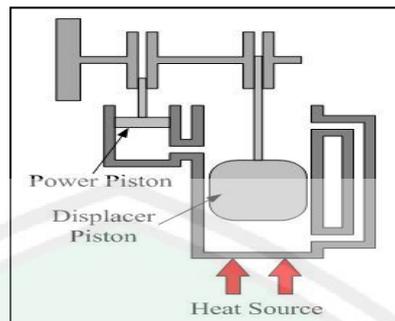
Gambar 2.10 Siklus Mesin Stirling Beta (Reynold, 1991)

Siklus Kerja Mesin Stirling Beta:

1. Piston tenaga (abu-abu atas) telah mengkompresi gas, piston displacer (abu-abu bawah) telah bergerak sehingga sebagian besar gas panas masuk kedalam silinder panas.
2. Gas yang dipanaskan meningkatkan tekanan dan mendorong piston tenaga ke batas terjauh (titik bawah).
3. Piston displacer sekarang bergerak ke titik puncak, dan mengirim gas panas ke silinder dingin.
4. Gas didinginkan dan sekarang dikompresi oleh piston dengan tenaga momentum dari roda gila. Langkah Ini membutuhkan energi yang lebih sedikit, karena tekanannya turun ketika didinginkan.

2.6.3 Mesin Stirling Tipe Gama

Mesin stirling Gamma mirip dengan mesin stirling beta, pada mesin stirling jenis ini piston tenaganya terpasang di dalam silinder yang terpisah di samping silinder piston displacer, tapi masih terhubung ke roda gila yang sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena berada dalam satu ruang. Konfigurasi ini menghasilkan rasio kompresi lebih rendah, tetapi secara mekanis lebih sederhana dan sering digunakan di dalam mesin stirling multi silinder.

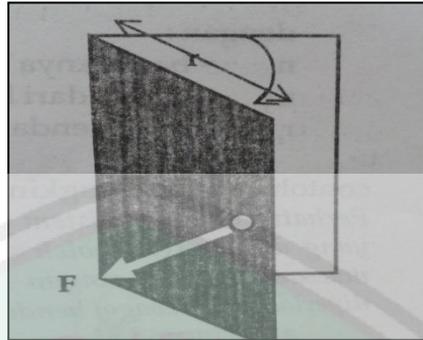


Gambar 2.11 Mesing Stirling Tipe Gama (Reynold, 1991)

2.7 Parameter Unjuk Kerja Mesin Stirling

2.7.1 Torsi (Momen Gaya)

Penyebab gerak suatu benda adalah gaya. Pada gerak rotasi, sesuatu yang menyebabkan benda berotasi atau berputar disebut momen gaya atau torsi. Dalam gerak rotasi penyebab berputarnya benda merupakan momen gaya (Torsi). Besarnya momen gaya (torsi) bergantung pada gaya yang dikeluarkan serta jarak antara sumbu putaran dan letak gaya. Torsi timbul karena adanya gaya-gaya yang membentuk kopel yang cenderung memuntir batang terhadap sumbu longitudinalnya. Seperti diketahui dari statika, momen kopel merupakan hasil kali dari gaya dan jarak tegak lurus antara garis kerja gaya. Satuan untuk momen pada USCS adalah (lb-ft) dan (lb-in), sedangkan untuk satuan SI adalah (N.m) (Halliday, 1991).



Gambar 2.12 Momen gaya menyebabkan gerak rotasi benda (Halliday, 1991)

Torsi, atau momen gaya adalah gaya yang menyebabkan sebuah benda dapat berputar pada porosnya. Jika gaya F yang dapat membuat benda berpindah sejauh r , maka torsi adalah analogi (perbandingan) gaya pada kasus gerak melingkar (Ishaq, 2007: 118-119).

Momen gaya atau torsi didefinisikan sebagai hasil kali antara gaya dengan titik ke garis kerja gaya pada arah tegak lurus. Maka besarnya momen gaya adalah:

$$\tau = F \cdot d = F \cdot r$$

Dimana: τ = momen gaya (N.m)

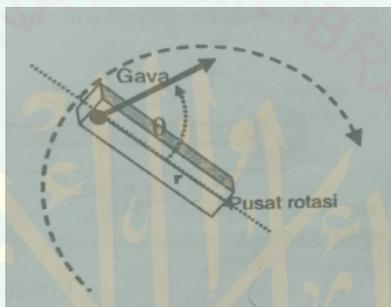
F = gaya yang bekerja (N)

R = jarak atau lengan (m)

Contoh sederhana, ketika kita membuka pintu dengan mendorong pegangan pintu, kita memberikan gaya F pada jarak r dari engsel, maka artinya kita memberikan torsi sebesar t , dimana hubungan gaya, torsi dan jarak lengan adalah (Ishaq, 2007:119):

$$\tau = r \times F$$

Jika kita mendorong pintu dekat dengan engsel, maka torsi mengecil dan akan menghasilkan putaran pintu yang kecil pula. Bahkan jika $r=0$, yaitu kita mendorong pintu pada engselnya, pintu sama sekali tidak akan berputar sebab torsi bernilai 0. Demikian juga jika sudut dibuat mengecil, maka torsi juga mengecil, bahkan jika $q=0$, yaitu jika kita mendorong pintu sejajar dengan pintu (bukan tegak lurus), maka tentu saja pintu tidak akan berputar.



Gambar 2.13 Sudut anatar F dan r menentukan besarnya torsi (Ishaq, 2007: 119)

Pada motor bakar untuk mengetahui daya poros harus diketahui dulu torsinya. Pengukuran torsi pada poros motor bakar menggunakan alat yang dinamakan dinamometer. Prinsip kerja dari alat ini adalah dengan memberi beban yang berlawanan terhadap arah putaran sampai putaran mendekati 0 rpm. Beban ini nilainya adalah sama dengan torsi poros. Dapat dilihat dari gambar 2.20 adalah prinsip dasar dari dinamometer. Dari gambar dibawah dapat dilihat pengukuran torsi pada poros (rotor) dengan prinsip pengereman dengan stator yang dikenai beban sebesar w . Mesin dinyalakan kemudian pada poros disambungkan dengan dinamometer. Untuk mengukur torsi mesin pada poros mesin diberi rem yang disambungkan dengan w pengereman atau pembebanan. Pembebanan diteruskan sampai poros mesin hampir berhenti berputar. Beban maksimum yang terbaca

adalah gaya pengereman yang besarnya sama dengan gaya putar poros mesin F . Dari definisi disebutkan bahwa perkalian antara gaya dengan jaraknya adalah sebuah torsi, dengan definisi tersebut Torsi pada poros dapat diketahui dengan rumus:

$$T = w \times d \text{ (Nm)}$$

dengan: T = torsi mesin (Nm)

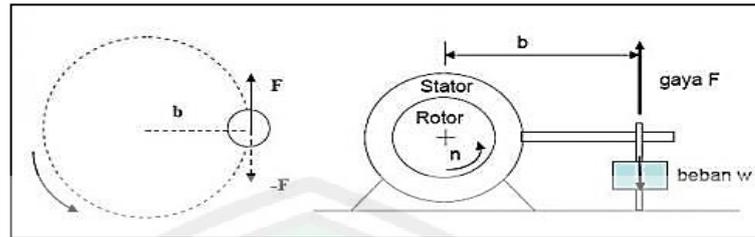
W = beban (N)

d = jarak pembebanan dengan pusat perputaran (m)

Ingat W (beban berat) disini kita bedakan dengan massa (m), kalau masa satuan Kg, adapun beban disini adalah gaya berat dengan satuan N diturunkan dari:

$$W = m \cdot g$$

Pada mesin sebenarnya pembebanan adalah komponen-komponen mesin sendiri yaitu perlengkapan mesin (pompa air, pompa pelumas, kipas radiator), generator listrik (pengisian aki, listrik penerangan, penyalan busi), gesekan mesin dan komponen lainnya. Dari perhitungan torsi diatas dapat diketahui jumlah energi yang dihasilkan mesin pada poros. Jumlah energi yang dihasilkan mesin setiap waktunya adalah yang disebut dengan daya mesin. Kalau energi yang diukur pada poros mesin dayanya disebut daya poros.



Gambar 2.14 Prinsip Dinamometer (Ishaq, 2007: 119)

2.7.2 Kecepatan Sudut (rpm)

Kecepatan sudut sering digunakan untuk menggambarkan rotasi suatu objek dalam lintasan melingkar. Biasanya didefinisikan sebagai laju perubahan yang kaitannya dengan waktu dari perpindahan sudut, atau perubahan posisi dari sebuah partikel atau benda lain. Biasanya ditentukan oleh garis tegak lurus terhadap kurva lingkaran kecepatan sudut juga tegak lurus terhadap arah di mana ada sesuatu yang berputar (Nugroho, 2012).

Kecepatan suatu benda umumnya ditentukan oleh kecepatan sudutnya. Untuk menghitung atribut ini, posisi awal suatu benda biasanya dikurangi dari posisi akhir. Jumlah yang dihitung kemudian dibagi dengan waktu untuk mendapatkan dari satu tempat ke tempat lain. Oleh karena itu, kecepatan sudut biasanya diukur sebagai perjalanan sepanjang lingkaran dalam periode waktu tertentu. Derajat, putaran, atau satuan lingkaran disebut radian perjalanan setiap detik dapat dihitung. Kecepatan sudut juga disebut kecepatan anguler. RPM (*Rotation Per Minute*) atau kemampuan kecepatan putaran dari motor.

2.7.3 Daya (Power)

Daya dihitung dengan satuan Kw (Kilo watts) atau *Horse Power* (HP) mempunyai hubungan erat dengan torsi. Daya dirumuskan sebagai berikut (Nugroho, 2012):

$$P = \tau \times \omega$$

dimana: P = Daya dalam kilowatt (kW)

τ = Torsi dalam newton meter (Nm)

ω = Kecepatan sudut dalam Rotasi Per Minutes (RPM)

Rumus diatas adalah rumus dasarnya, pada engine maka rumusnya menjadi:

$$P = \tau \times \omega \times 2\pi$$

Untuk mengukur Power (KW) adalah:

$$P \text{ (KW)} = \tau \text{ (Nm)} \times 2\pi \times \omega \text{ (RPM)} / 60000$$

6000 dapat diartikan adalah 1 menit = 60 detik, dan untuk mendapatkan KW = 1000 watt.

2.8 Kelebihan Mesin Stirling

1. Frekuensinya stabil atau konstan.
2. Mesin Stirling dapat bekerja pada sembarang sumber energi panas, termasuk bahan kimia, sinar surya (solar), limbah pertanian (sekam, tempurung kelapa dsb), kayu bakar, berbagai produk minyak bakar (biomassa, biofuel dsb), panas bumi dan nuklir.
3. Implementasi mesin stirling banyak sekali, namun sebagian besar masuk pada kategori mesin piston resiprokal.

4. Perbedaan yang menyolok dengan mesin pembakaran internal adalah potensi untuk menggunakan sumber panas terbarukan pada mesin Stirling lebih mudah, suara mesin lebih lembut (tenang), tidak berisik dan biaya perawatannya lebih rendah.
5. Biaya kapital per unit daya lebih rendah dibandingkan dengan mesin pembakaran internal untuk daya yang sama, maka biaya investasi mesin Stirling untuk saat ini umumnya masih lebih besar dan lebih berat, namun perawatannya jauh lebih mudah dan ekonomis. Sehingga secara menyeluruh biaya energinya masih dapat bersaing ketat. Efisiensi panasnya juga berimbang (untuk mesin-mesin yang kecil) berkisar antara 15% – 30%. Dengan basis biaya investasi per unit daya diatas, untuk unit generator dengan kapasitas s/d 100 kW., mesin Stirling masih kompetitif harganya.

2.9 Generator

Generator adalah salah satu komponen yang dapat mengubah energi gerak menjadi energi listrik. Prinsip kerjanya dapat dipelajari dengan teori medan elektronik. Poros pada generator dipasang dengan material ferromagnetic permanen. Setelah itu disekeliling porosnya terdapat stator yang bentuk fisiknya adalah kumparan-kumparan kawat yang membentuk loop. Ketika poros generator mulai berputar maka akan terjadi perubahan fluks pada stator yang akhirnya terjadi perubahan tegangan dan arus listrik tertentu

Tegangan atau arus listrik yang dihasilkan ini disalurkan melalui kabel jaringan listrik. Berdasarkan arus yang disalurkan generator dibagi menjadi dua jenis, yaitu generator AC (bolak balik) dan generator DC (searah). Generator AC

atau alternator bekerja pada prinsip yang sama dari induksi elektromagnetik sebagai generator DC. Arus bolak-balik dapat dihasilkan dari perputaran lilitan pada medan magnet atau perputaran medan magnet pada lilitan stationer (seimbang atau tidak berubah). Nilai dari tegangan tergantung pada jumlah perputaran pada lilitan, kekuatan medan dan kecepatan rotasi lilitan/medan magnet (Zuhal, 1998).

2.8.1 Generator Arus Bolak-Balik (AC)

Sebuah generator arus bolak balik mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Dalam pembelajaran secara magnetik, menunjukkan arus yang dibawa konduktor menghasilkan sebuah daerah magnet disekelilingnya. Ini juga akan merubah medan magnet yang akan menghasilkan elektromagnetik pada konduktor. Jika sebuah konduktor berada dalam medan magnet atau diantara medan magnet itu dan pergerakan konduktor, ini yang disebut dengan induksi elektromagnetik. Listrik arus bolak balik (*listrik AC – alternating current*) adalah arus listrik dimana besarnya dan arahnya arus berubah-ubah secara bolak-balik. Berbeda dengan listrik arus searah dimana arah arus yang mengalir tidak berubah-ubah dengan waktu. Bentuk gelombang sinusoida, karena ini yang memungkinkan pengaliran energi yang paling efisien. Karakteristik dari daya yang dihasilkan oleh generator arus bolak-balik adalah nilai faktor daya (Zuhal, 1998).

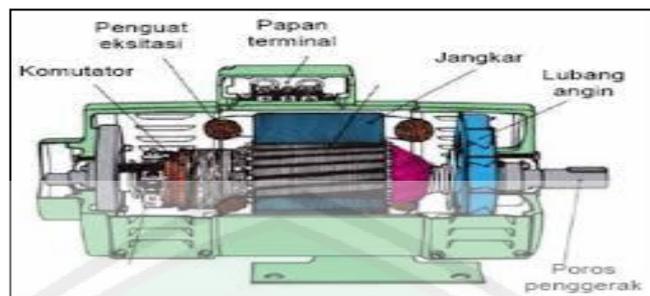
Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (watt) dengan daya semu atau daya total (VA), atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu atau daya total. Daya reaktif yang tinggi akan meningkatkan sudut ini

dan sebagai hasilnya faktor daya akan menjadi lebih rendah. Faktor daya selalu lebih kecil atau sama dengan satu. Secara teoritis, jika seluruh beban daya yang dipasok oleh perusahaan listrik memiliki faktor daya satu, maka daya maksimum yang di transfer setara dengan kapasitas sistem pendistribusian sehingga, dengan beban yang terinduksi dan jika faktor daya berkisar dari 0,2 hingga 0,5, maka kapasitas jaringan distribusi listrik menjadi tertekan. Jadi, daya reaktif (VAR) harus serendah mungkin untuk keluaran kW yang sama dalam rangka meminimalkan kebutuhan daya total (VA). Faktor daya atau faktor kerja menggambarkan sudut fase antara daya aktif dan daya semu. Faktor daya yang rendah merugikan karena mengakibatkan arus beban tinggi. Perbaikan faktor daya ini menggunakan kapasitor.

2.8.2 Generator Arus Searah (DC)

Generator DC merupakan sebuah perangkat mesin listrik dinamis yang mengubah energi mekanis menjadi energi listrik. Generator DC menghasilkan arus DC atau arus searah. Generator DC dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (anker), jenis generator DC yaitu (Zuhal, 1998):

1. Generator penguat terpisah
2. Generator shunt
3. Generator kompon



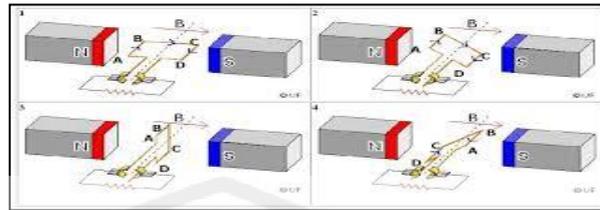
Gambar 2.15 Konstruksi Generator DC (Zuhal, 1998)

Pada umumnya generator DC dibuat dengan menggunakan magnet permanen dengan 4-kutub rotor, regulator tegangan digital, proteksi terhadap beban lebih, starter eksitasi, penyerah, bearing dan rumah generator atau casis, serta bagian rotor. Gambar 2.18 menunjukkan potongan melintang konstruksi generator DC.

Generator DC terdiri dari dua bagian, yaitu stator bagian mesin DC yang diam, dan bagian rotor, yaitu bagian mesin DC yang berputar. Bagian stator terdiri dari: rangka motor, belitan stator, sikat arang, bearing dan terminal box. Sedangkan bagian rotor terdiri dari: komutator, belitan rotor, kipas rotor dan poros rotor.

Syarat untuk dapat dibangkitkan GGL adalah:

1. Harus ada konduktor (hantaran kawat)
2. Harus ada medan magnetik
3. Harus ada gerak atau perputaran dari konduktor dalam medan, atau ada fluksi yang berubah dan memotong konduktor itu.



Gambar 2.16 Prinsip Kerja Generator DC (Zuhal, 1998)

Untuk perolehan arus searah dari tegangan bolak-balik, meskipun tujuan utamanya adalah pembangkitan tegangan searah, tampak bahwa tegangan kecepatan yang dibangkitkan pada kumparan jangkar merupakan tegangan bolak-balik. Bentuk gelombang yang berubah-ubah tersebut karena harus disearahkan. Untuk mendapatkan arus searah dari arus bolak-balik dengan menggunakan saklar, komutator dan dioda (Zuhal, 1998).

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini yaitu penelitian Eksperimental. Penelitian eksperimental bertujuan untuk memperoleh desain dan pembuatan mesin stirling tenaga matahari dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box* untuk pembangkit listrik sekaligus karakterisasi unjuk kerjanya.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Bulan Maret – Juni 2016. Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Termodinamika dan Laboratorium Elektronika Jurusan Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang.

3.3 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

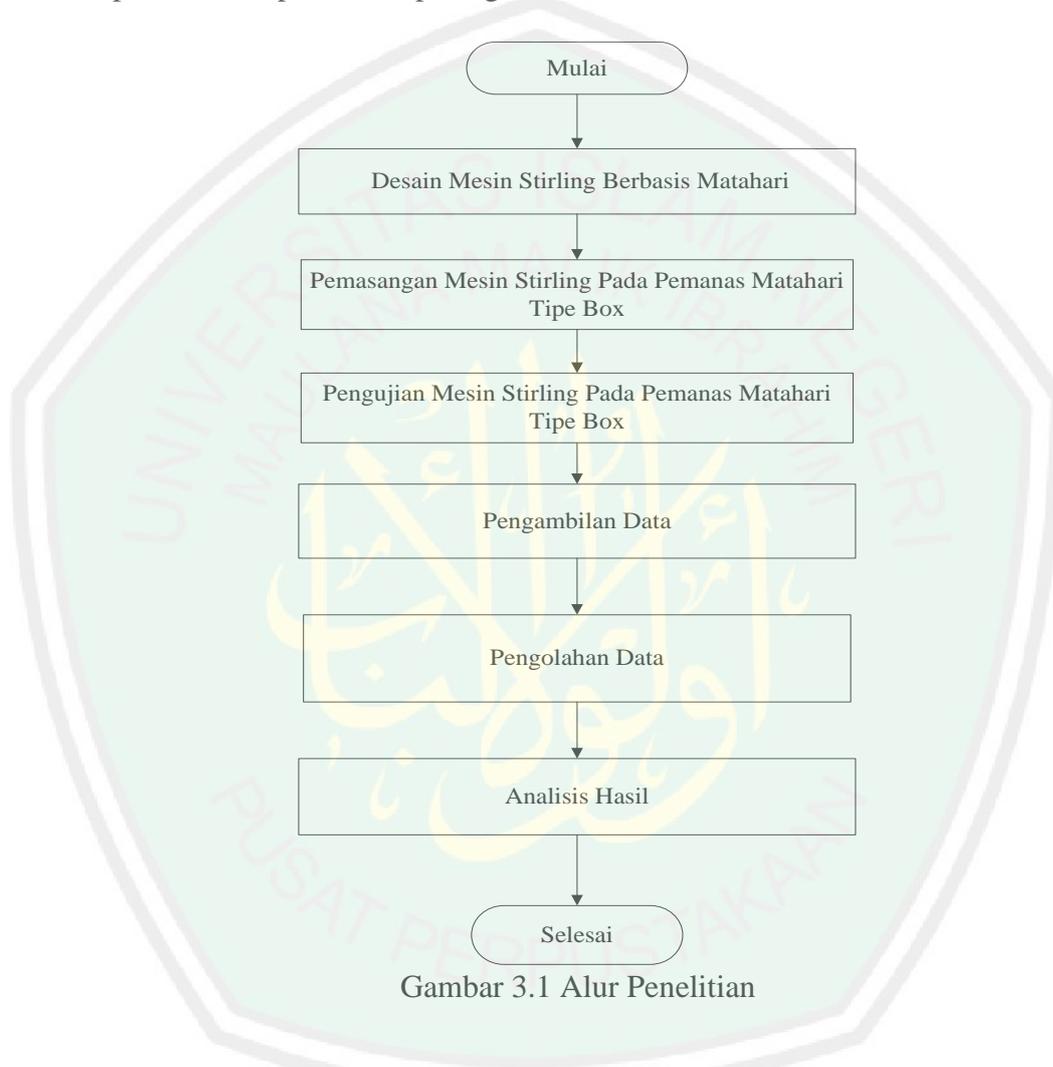
1. Tabung Displacer dengan diameter 10,5 cm dan tinggi 9,5 cm yang terbuat dari bahan *stainless*.
2. *Silinder power* yang berukuran 2.5 mm yang terbuat dari kuningan.
3. Roda gila dengan diameter 12 cm dan tebal 0,4 cm yang terbuat dari *compact disk*.
4. *Piston power* dengan diameter 24,5 mm yang terbuat dari bahan aluminium.
5. *Piston displacer* dengan diameter 10 cm dan tinggi 4 cm yang terbuat dari kertas TBA dan spons.

6. Kertas TBA berdiameter 10 cm dan spons dengan tinggi 4 cm dan diameternya 10 cm.
7. Penyangga *kruck as* dengan diameter 24 cm yang terbuat dari plat besi.
8. *Pin road* dengan panjang 2 cm.
9. *Connecting rod piston power* dengan panjang 8 cm.
10. *Kruck as* dengan panjang 4 cm dan diameter 3,5 cm dengan jari-jari teflon 0,0175 m.
11. *Boast connecting road* dengan panjang 2,5 cm.
12. Tutup *displacer* dengan diameter 22 cm.
13. *Fanbelt* yang terbuat dari karet.
14. Pemanas matahari tipe *box*.
15. Tachometer untuk mengukur rpm.
16. Neraca pegas untuk mengukur torsi.
17. Generator.
18. Multimeter dan alat pendukung lainnya yang tersedia di bengkel elektronika.

3.4 Alur Percobaan

Berdasarkan literatur tahap selanjutnya adalah perancangan penelitian.

Alur penelitian dapat dilihat pada gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1 Alur Penelitian

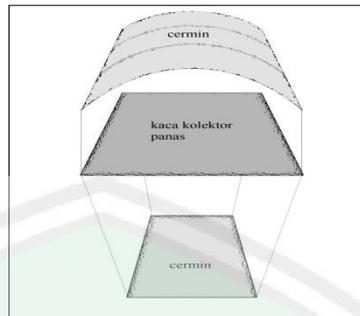
3.5 Desain Mesin Stirling Berbasis Matahari

Desain mesin Stirling yaitu mengenai penentuan rancang bangun mesin Stirling yang dapat meningkatkan kinerja mesin dengan bantuan pemanas matahari tipe *box*. Dalam hal ini silinder mesin Stirling terbuat dari pipa besi dengan diameter 10 cm dan tinggi 30 cm. Diletakkan displacer dalam silinder dengan ukuran displacer lebih kecil dari diameter silinder yang fungsinya untuk

antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin yang terbuat dari bahan isolator. Dibuatkan isolasi termal antara dinding silinder panas dan dingin sebagai pemisah kedua ujung silinder. Dipasang piston daya yang terbuat dari aluminium di dalam silinder bagian atas, lalu dihubungkan piston daya dan displacer dengan *connecting rod* ke roda gila dengan diameter roda gila 19 cm. Dihubungkan roda gila ke generator dengan menggunakan *fanbelt* dan dipasangkan mesin Stirling pada pemanas matahari tipe *box* untuk di uji coba.

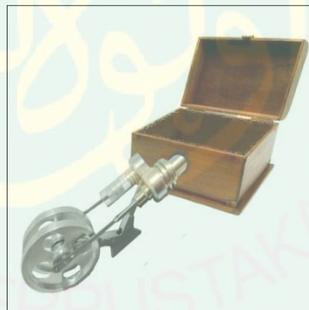
3.6.Pemasangan Mesin Stirling Pada Pemanas Matahari Tipe *Box*

Box meliputi bagian *box* dan tutup yang berbentuk setengah dari tabung yang dapat dibuka tutup sesuai dengan penangkapan cahaya matahari sehingga dapat diteruskan pada bagian dalam *box*. Susunan cermin lebar 5 cm panjang 50 cm sebagai reflektor dan pemfokus cahaya matahari, kayu triplek, aluminium foil. Perancangan desain pemanas matahari tipe *box* dapat dilihat pada gambar 3.3 terlihat yang berwarna abu-abu adalah berbahan kaca sebagai kolektor panas yang bersifat menyimpan panas dengan prinsip seperti efek rumah kaca, sedangkan bagian yang berwarna putih berbahan cermin yang menghadap ke dalam bagian *box* matahari sebagai reflektor. Pada bagian tutup berbentuk setengah lingkaran dengan diameter 25 cm.



Gambar 3.2 Bahan Pembuatan *Box*

Dalam pemasangan mesin Stirling pada pemanas matahari tipe *box* ini akan disesuaikan letak nya. Pada bagian ruang panas mesin Stirling akan berada pada bagian dalam *box*, sedangkan ruang dingin pada mesin Stirling akan berada pada di luar *box*, hal ini dilakukan untuk menjaga suhu agar tetap stabil. Seperti di tunjukan pada gambar 3.3 di bawah ini:



Gambar 3.3 Pemasangan Mesin Stirling Pada Pemanas Tipe *Box*

3.7 Pengujian Mesin Stirling Pada Pemanas Matahari Tipe *Box*

Pengujian mesin stirling ini dilakukan dengan diletakkannya mesin Stirling pada pemanas matahari tipe *box* di halaman untuk mengukur pengaruh intensitas matahari terhadap kenaikan suhu pada mesin Stirling, mengukur perbedaan suhu terhadap putaran (rpm dan torsi) pada mesin Stirling dan untuk mengetahui besar efisiensi sistem yang dihasilkan oleh rancangan mesin Stirling tersebut.

3.8 Pengambilan Data

Proses pengambilan data pertama yaitu untuk mengetahui pengaruh intensitas matahari terhadap kenaikan suhu pada mesin Stirling sebagai pembangkit energi dengan memanfaatkan pemanas matahari tipe *box*. Pada proses ini digunakan alat luxmeter untuk mengukur intensitas matahari dan termokopel untuk mengukur suhu panas dan suhu dingin pada mesin stirling. Proses pengambilan data kedua yaitu untuk mengetahui pengaruh perbedaan suhu terhadap putaran pada mesin Stirling. Alat yang digunakan pada proses ini adalah termometer yang diletakkan pada bagian dingin dan bagian panas mesin stirling, sedangkan untuk mengukur rpm digunakan tachometer. Untuk pengambilan data dilaksanakan selama 3 hari, dan setiap harinya dimulai dari pukul 11.00 WIB – 14.00 WIB, dengan pencatatan data suhu panas, suhu dingin, kecepatan putar, torsi, daya dan tegangan yang di hasilkan oleh generator.

Variabel uji yang digunakan meliputi nilai suhu panas dan dingin pada silinder mesin stirling dengan menggunakan termometer. Intensitas cahaya matahari diukur dengan luxmeter, dan diukur pula nilai rpm dan torsi pada output mekanik mesin Stirling. Selanjutnya diukur tegangan yang dihasilkan untuk dengan menggunakan multimeter.

3.9 Pengolahan Data

Hasil yang didapat berupa data akan disimpan secara otomatis pada Ms.Excel.

Tabel 3.1 Format Tabel Data Hasil Penelitian

No	Intensitas matahari (W/m ²)	Suhu panas (°C)	Suhu Dingin (°C)	Kecepatan Generator (rad/s)	Torsi (N.m)	Daya (Watt)	Tegangan (Volt)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

3.10 Analisis Hasil

Analisis yang digunakan adalah analisis korelasi untuk mengetahui pengaruh intensitas matahari terhadap kenaikan suhu pada mesin Stirling dan untuk mengetahui pengaruh perbedaan suhu terhadap putaran pada mesin Stirling sehingga akan diketahui besar efisiensi sistem pada rancangan mesin Stirling.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Prosedur Pengukuran

Cara kerja mesin Stirling memanfaatkan perbedaan suhu pada reservoir untuk menggerakkan piston sehingga dihasilkan gerak. Gerak yang dilakukan oleh mesin Stirling memiliki 4 siklus yaitu ekspansi isothermal, ekspansi isokhorik, kompresi isothermal, dan kompresi isokhorik. Sumber panas yang digunakan mesin stirling pada penelitian ini adalah cahaya matahari yang dikonversi menggunakan pemanas matahari tipe box.

Sensor termokopel digunakan untuk mengukur temperatur resevoir yang berada pada mesin stirling. Luxmeter digunakan untuk mengukur intensitas cahaya matahari. Pengukuran tegangan yang dihasilkan dinamo DC menggunakan multimeter. Pengukuran kecepatan putar atau rpm dengan menggunakan tachometer digital. Neraca pegas digunakan untuk mengukur torsi yang terdapat pada roda gila mesin stirling.

Pengukuran perbedaan suhu pada resevoir menggunakan termokopel dilakukan dengan cara meletakkan termokopel pada bagian reservoir dingin dan reservoir panas, sehingga didapatkan perbedaan suhu. Pengukuran intensitas cahaya matahari dilakukan menggunakan luxmeter dengan cara mengukur intensitas cahaya matahari yang datang. Pengukuran torsi dilakukan menggunakan neraca pegas dengan cara mengaitkan neraca pegas pada roda gila yang bergerak. Pengukuran rpm menggunakan tachometer dengan cara menembakan laser pada tachometer menuju titik hitam pada roda gila.

4.2 Hasil Penelitian

Telah dilakukan penelitian mesin stirling dengan pengkonversi sinar matahari tipe box. Penggunaan tipe box bertujuan untuk mengonversi sinar yang dihasilkan matahari dan digunakan sebagai sumber panas mesin Stirling. Beberapa pengukuran telah dilakukan untuk mengetahui kinerja mesin Stirling, yaitu: pengukuran perbedaan suhu resevoir, pengukuran intensitas matahari, pengukuran torsi dan pengukuran kecepatan putar. Data pengukuran yang didapatkan digunakan untuk menghitung efisiensi mesin stirling.

4.2.1 Data Hasil Pengukuran Intensitas

Tabel 4.1 Tabel pengukuran intensitas mesin Stirling hari pertama

Intensitas (W/m ²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)
755	84	117
800	89	129
834	113	126
851	116	139
940	148	144

Tabel 4.1 menunjukkan data pengukuran pada hari pertama. Intensitas yang dihasilkan semakin besar maka perubahan suhu juga akan naik dan menyebabkan kecepatan putar (rpm) pada mesin Stirling akan semakin meningkat. Data ketiga menunjukkan kenaikan yang drastis dari perbedaan suhu 89°C menjadi 113°C, hal itu disebabkan karena panas awal yang disimpan oleh mesin Stirling masih belum stabil namun suhu sudah meningkat.

Tabel 4.2 Tabel pengukuran intensitas mesin Stirling hari kedua

Intensitas (W/m²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)
755	87	120
800	89	127
834	102	138
851	106	142
940	119	149

Tabel 4.2 menunjukkan data pengukuran pada hari kedua. Intensitas yang dihasilkan semakin besar maka perubahan suhu juga akan naik dan menyebabkan kecepatan putar (rpm) pada mesin Stirling akan semakin meningkat. Kecepatan putar tertinggi berada pada 149 rad/s dengan suhu 119°C dan pada intensitas cahaya matahari 940 W/m².

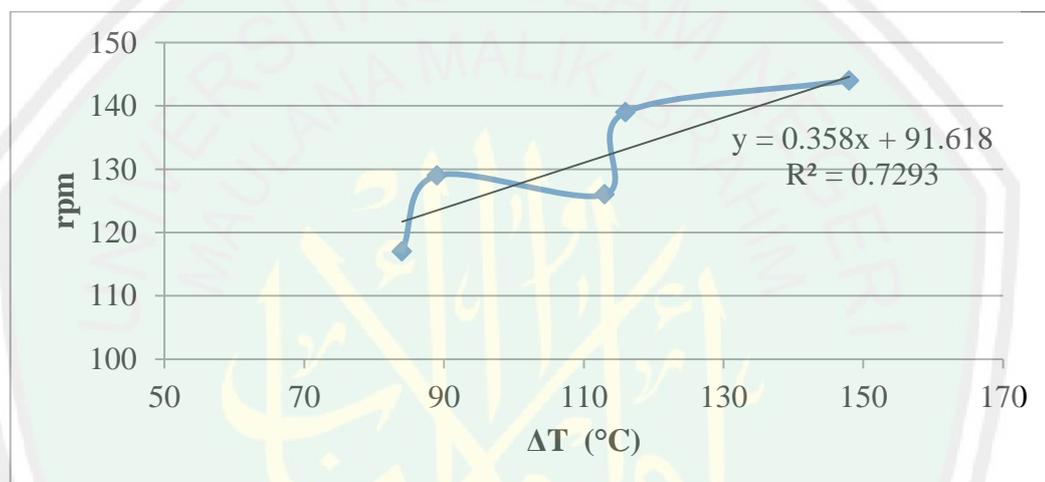
Tabel 4.3 Tabel pengukuran intensitas mesin Stirling hari ketiga

Intensitas (W/m²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)
755	77	122
800	82	128
834	120	139
851	127	145
940	130	150

Tabel 4.3 menunjukkan data pengukuran pada hari ketiga. Intensitas yang dihasilkan semakin besar maka perubahan suhu juga akan naik dan menyebabkan kecepatan putar pada mesin Stirling akan semakin meningkat. Putaran tertinggi berada pada 150 rad/s dengan suhu 130°C dan pada intensitas cahaya matahari 940 W/m².

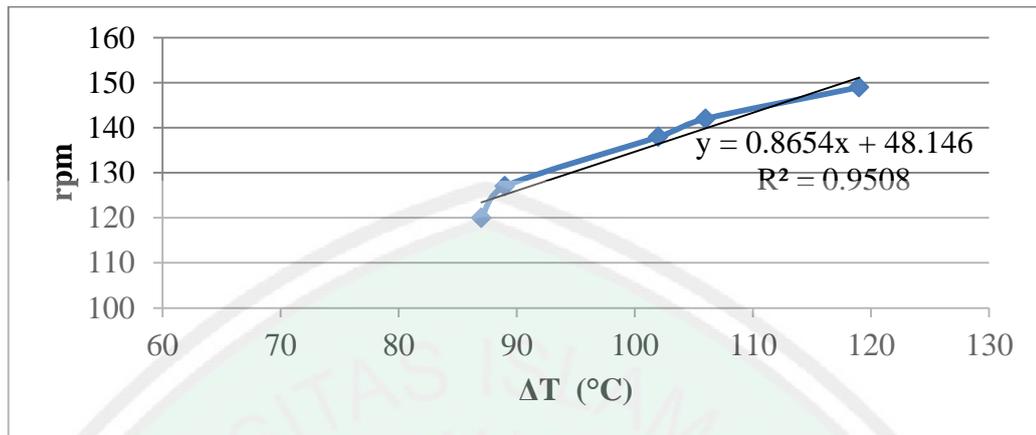
4.2.2 Analisis hubungan antara perubahan suhu (ΔT) dengan kecepatan putar (rpm)

Untuk memudahkan dalam menganalisis kecepatan putar pada mesin Stirling maka dibuat grafik antara perbedaan suhu terhadap kecepatan putar selama pengujian didapatkan hasil seperti grafik 4.1 dibawah ini:



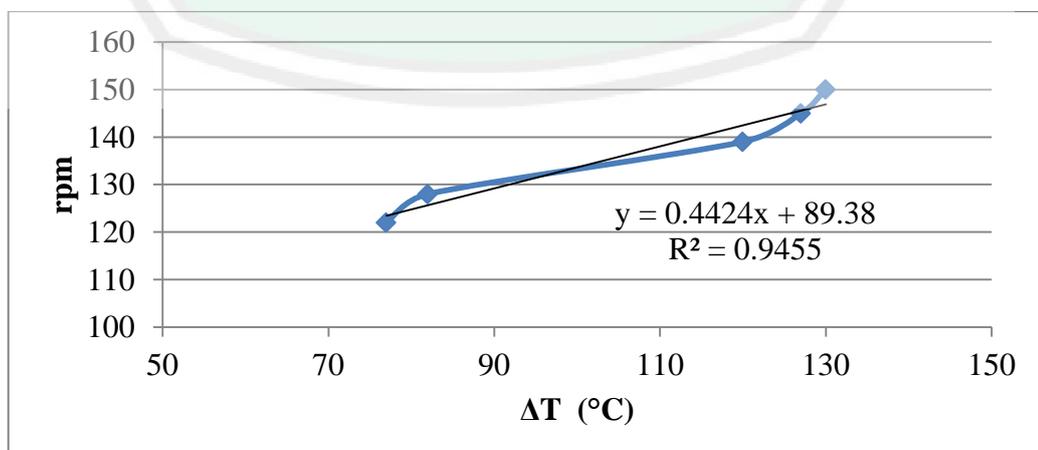
Gambar 4.1 Grafik hubungan antara ΔT dengan rpm hari pertama (18 Juni 2016)

Grafik 4.4 menampilkan hubungan antara perubahan suhu (ΔT) dengan kecepatan putar pada hari pertama. Terlihat jelas ketika perubahan suhu naik maka kecepatan putar yang dihasilkan juga akan semakin cepat. Nilai kelinieran dari grafik tersebut adalah 0,729, yang berarti masih belum menunjukkan bahwa perbedaan suhu belum stabil dikarenakan terjadi kenaikan suhu yang tidak konstan.



Gambar 4.2 Grafik hubungan antara ΔT dengan rpm hari kedua (19 Juni 2016)

Grafik 4.2 menampilkan grafik pengukuran perubahan suhu (ΔT) terhadap kecepatan putar pada hari kedua. Grafik tersebut menunjukkan perbedaan suhu sangat berpengaruh terhadap kecepatan putar. Semakin besar perubahan suhu maka kecepatan putar juga akan semakin meningkat. Nilai regresi yang dihasilkan adalah $y = 0.865x + 48.14$ dengan nilai $R^2 = 0.950$, artinya nilai linieritasnya mendekati nilai 1.00 dan ini menunjukkan hubungan antara perubahan suhu dan kecepatan putar berbanding lurus, apabila nilai perubahan suhunya semakin tinggi maka nilai putar yang dihasilkan oleh mesin Stirling juga semakin cepat.



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara ΔT dengan rpm hari ketiga (20 Juni 2016)

Grafik 4.3 menampilkan hasil pengukuran perubahan suhu terhadap kecepatan putar pada hari ketiga. Terdapat kenaikan suhu yang konstan yang mempercepat putaran. Nilai kecepatan putar yang dihasilkan dalam rentan yang kecil, sehingga sering muncul data hasil pengukuran kecepatan putar yang konstan. Nilai linieritas yang dihasilkan adalah 0.945 yang menunjukkan bahwa peningkatan nilai perubahan suhu semakin tinggi maka dihasilkan nilai rpm yang semakin meningkat.

Grafik 4.3 menunjukkan hubungan antara kecepatan putar dengan perubahan suhu. Apabila perubahan suhu semakin besar maka putaran pada mesin stirling juga akan semakin meningkat. Semakin besar perubahan suhu maka kecepatan putar pada mesin Stirling juga akan semakin meningkat. Perubahan suhu yang mempengaruhi kecepatan putar pada mesin Stirling paling besar terjadi pada pengulangan hari kedua tanggal 19 Juni 2016.

4.2.3 Data hasil pengukuran putaran dengan torsi

Pada sebuah mesin, hubungan torsi dengan putaran tidak selalu linier (Ishaq, 2007). Pengukuran torsi pada penelitian ini menggunakan dua buah neraca pegas yang digantungkan dan diberi beban berlawanan arah hingga kecepatan putarnya mendekati 0. Tabel 4.4 di bawah ini menunjukkan hasil pengukuran torsi hari pertama:

Tabel 4.4 Tabel Pengukuran Torsi Pada Hari Pertama

ΔT ($^{\circ}C$)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)
84	117	0.0059
89	129	0.0059
113	126	0.0063
116	139	0.0063
148	144	0.0065

Tabel 4.4 menampilkan tabel hubungan kecepatan putar dengan torsi pada hari pertama. Torsi mengalami kenaikan ketika kecepatan putar yang dihasilkan mesin Stirling meningkat. Peningkatan torsi masih belum signifikan, hal ini dikarenakan pengukuran masih menggunakan metode yang sederhana.

Tabel 4.5 Tabel Pengukuran Torsi Pada Hari Kedua

ΔT ($^{\circ}C$)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)
87	120	0.0063
89	127	0.0064
102	138	0.0063
106	142	0.0059
119	149	0.0058

Tabel 4.5 menampilkan tabel hubungan antara kecepatan putar dengan torsi pada hari kedua. Awalnya nilai torsi mengalami kenaikan, akan tetapi setelah jumlah putaran meningkat nilai torsi semakin menurun. Hal ini dikarenakan bagian reservoir dingin terkontaminasi oleh reservoir panas sehingga torsi yang dihasilkan semakin menurun.

Tabel 4.6 Tabel Pengukuran Torsi Hari Ketiga

$\Delta T(^{\circ}C)$	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)
77	122	0.0063
82	128	0.0064
120	139	0.0063
127	145	0.006
130	150	0.0063

Tabel 4.6 menunjukkan tabel hubungan antara kecepatan putar dengan torsi pada hari ketiga. Dapat terlihat jelas pada tabel, mulanya kecepatan putar mengalami kenaikan dan seiring dengan bertambahnya kecepatan putar maka torsi yang dihasilkan semakin rendah.

4.2.4 Data hasil perhitungan Efisiensi

Data pengukuran yang telah dihasilkan digunakan untuk menghitung nilai efisiensi mesin stirling. Hasil perhitungan efisiensi dengan beberapa parameter sebagai berikut:

Tabel 4.7 Tabel efisiensi hari pertama

Intensitas (W/m ²)	$\Delta T (^{\circ}C)$	Rpm (Rad/s)	Efisiensi Sistem (%)	Efisiensi Generator (%)
755	84	117	10.5	0.01
800	89	129	10.9	0.01
834	113	126	10.9	0.01
851	116	139	11.8	0.05
940	148	144	11.4	0.05

Tabel 4.7 menunjukkan hubungan intensitas matahari, perbedaan suhu, rpm, efisiensi sistem dan efisiensi generator. Rata-rata efisiensi yang dihasilkan oleh mesin Stirling adalah 10%, dan efisiensi yang dihasilkan oleh generator adalah 0.05%. Efisiensi sistem paling tinggi yang didapat pada hari pertama pengambilan

data adalah 11,8% pada intensitas 851 W/m² perubahan suhu 116°C dan pada kecepatan putar 139 rad/s. Efisiensi generator paling tinggi yaitu 0.05% pada intensitas 940 W/m², beda suhu 148°C dan pada kecepatan putar 144 rad/s.

Tabel 4.8 Tabel efisiensi mesin Stirling hari kedua

Intensitas (W/m²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)	Efisiensi Sistem (%)	Efisiensi generator (%)
755	87	120	11.5	0.01
800	89	127	11.7	0.01
834	102	138	12.0	0.05
851	106	142	11.3	0.05
940	119	149	10.6	0.05

Tabel 4.8 menunjukkan hubungan intensitas matahari, perbedaan suhu, rpm, efisiensi sistem dan efisiensi generator. Semakin besar intensitasnya maka perubahan suhu dan kecepatan putar meningkat. Rata-rata efisiensi yang dihasilkan adalah 11%. Efisiensi tertinggi didapatkan saat berada pada intensitas 834 W/m² pada perubahan suhu 102°C dan menghasilkan kecepatan putar 142 rad/s. Efisiensi generator tertinggi didapatkan pada intensitas cahaya 834-940 W/m², pada perubahan suhu 102-119°C yaitu 0.05%, dan pada kecepatan putar 138-149 Rad/s.

Tabel 4.9 tabel efisiensi mesin Stirling hari ketiga

Intensitas (W/m²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)	Efisiensi Sistem (%)	Efisiensi generator (%)
755	77	122	11.7	0.01
800	82	128	11.8	0.02
834	120	139	12.1	0.05
851	127	145	11.8	0.03
940	130	150	11.6	0.05

Tabel 4.9 menunjukkan hubungan intensitas matahari, perbedaan suhu, rpm, efisiensi sistem dan efisiensi generator. Semakin besar intensitasnya maka perubahan suhu dan kecepatan putar meningkat. Rata-rata efisiensi yang dihasilkan adalah 11%, sedangkan efisiensi sistem tertinggi yaitu 12,1% saat intensitas matahari 834 W/m² pada perubahan suhu 120°C dan menghasilkan kecepatan putar 139 rad/s. Efisiensi generator tertinggi dihasilkan pada intensitas 834 W/m² dan 940 W/m², pada perubahan suhu 120°C dan 130°C dan menghasilkan kecepatan putar 139 rad/s dan 150 rad/s dengan efisiensi generator 0.05%.

Menggunakan persamaan efisiensi (%) = $\frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100\%$, maka hasil efisiensi akan diketahui. Dengan $P_{out} = \text{rpm} \times \text{torsi}$, dan $P_{in} = \text{Intensitas} \times \text{Luas Stirling}$. . Perhitungan daya generator dengan menggunakan persamaan $P = \frac{V^2}{R}$, dimana V adalah voltase hasil pengukuran dan R adalah hambatan yang bernilai 11.4 Ω . Dari data dapat dilihat bahwa nilai efisiensi sistem paling tinggi yaitu 12,1% pada intensitas 834 W/m² dengan perbedaan suhu 120°C pada putaran 139 rad/s. Efisiensi generator paling tinggi yaitu 0.05% dari setiap pengulangan data. Daya generator yang dihasilkan yaitu 0.003905 Watt telah bisa digunakan untuk menyalakan lampu LED berwarna hijau

4.3 Pembahasan

Cara kerja mesin Stirling memanfaatkan perbedaan suhu pada reservoir untuk menggerakkan piston sehingga dihasilkan gerak. Gerak yang dilakukan oleh mesin Stirling memiliki 4 siklus yaitu ekspansi isothermal, ekspansi isokhorik,

kompresi isothermal, dan kompresi isokhorik. Pada penelitian ini perangkat mesin Stirling memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber energi untuk menghasilkan listrik.

Matahari sebagai pelita berarti dipermukaan matahari terdapat sumber energi yang dapat dibakar (dinyalakan) sehingga energinya dapat dikirim sampai ke bumi. Energi matahari dikirim ke bumi dalam bentuk radiasi gelombang elektromagnetis yang sampai ke bumi dalam bentuk panas. Bukankah secara tradisional energi matahari telah sejak lama digunakan untuk menjemur pakaian, mengeringkan padi sebelum ditumbuk, mengawetkan bahan makanan dan lain sebagainya. Sekarang ini energi matahari juga digunakan sebagai sumber tenaga untuk baterai matahari atau *solar cell* (Wardhana, 2004: 102).

وَهُوَ الَّذِي خَلَقَ اللَّيْلَ وَالنَّهَارَ وَالشَّمْسَ وَالْقَمَرَ كُلٌّ فِي فَلَكٍ يَسْبَحُونَ ﴿٣٣﴾

“Dan Dialah yang telah menciptakan malam dan siang, matahari dan bulan, masing-masing dari keduanya itu beredar di dalam garis edarnya” (Q.S. Al-Anbiya’: 33).

Menurut Qurtubi (2008: 764) Allah Swt menjadikan malam bagi mereka agar mereka bisa beristirahat, dan menjadikan siang agar mereka bisa bekerja untuk kehidupan mereka. Matahari, bulan, bintang-bintang, galaksi, malam, dan siang beredar di dalam garis edarnya.

Kata yang digunakan dalam ayat di atas adalah *Yasbahun*. *Yasbahun* berasal dari kata *sabaha*. Hal itu menyatakan gagasan tentang gerakan yang datang dari setiap gerakan tubuh, jika ada yang menggunakan kata *yasbah* untuk suatu benda angkasa di langit-langit seperti matahari bukan berarti bahwa hal itu hanyalah terbang di ruang angkasa, tetapi bahwa berarti benda-benda tersebut juga berputar

di ruang angkasa. Rotasi matahari tentang berputarnya pada sumbu dapat dibuktikan dengan bantuan beberapa peralatan yang memantulkan gambaran dari matahari diatas meja sehingga kita dapat mengujinya. Tercatat bahwa matahari mempunyai noda kilas yang melingkapi suatu gerak putar setiap 25 hari yaitu matahari berputar kira-kira 25 hari untuk sekali berputar pada sumbu apsisnya. Faktanya matahari berputar di ruang angkasa dengan perkiraan kecepatan 150 mil per detik dan dibutuhkan sekitar 200 juta tahun untuk melingkapi satu edaran disekitar pusat galaksi (Miller, 2008: 65).

Berdasarkan kajian fisika, cahaya mempunyai sifat dualisme, yakni selain bersifat sebagai gelombang, cahaya juga bersifat sebagai partikel yang disebut foton. Sebuah foton adalah satu kuantum energi elektromagnet yang diserap atau dipancarkan, dan sejalan dengan usulan Planck, tiap-tiap foton dari radiasi berfrekuensi ν memiliki energi (Krane, 2014):

$$E = h\nu \quad (4.1)$$

h adalah tetapan Planck yang mempunyai nilai sebesar $6,626 \times 10^{-34}$ Js. Energi bersifat kekal, yakni suatu energi dapat diubah menjadi energi lain yang lebih bermanfaat. Energi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik.

Radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi disebut insolation (*incoming solar radiation*) yang terdiri dari radiasi langsung (*direct radiation*) dan radiasi baur (*difusse radiation*). Dari seluruh radiasi yang datang hanya *Photosynthetically Active Radiation* (PAR) yang dapat dimanfaatkan tanaman. Kisaran radiasi PAR mendekati radiasi sinar tampak. Energi radiasi yang datang

di permukaan atmosfer selama satu tahun disebut tetapan radiasi surya (*solar constant*) yang besarnya sekitar 1.360 W/m^2 (Usmadi, 2006).

Konversi satuan radiasi yang banyak digunakan (Woodward FI, 1983):

$$1 \text{ J.m}^{-2}.\text{s}^{-1} = 1 \text{ W.m}^{-2}$$

$$10.000 \text{ foot-candle} = 350 \text{ W.m}^{-2}$$

$$1 \text{ foot-candle} = 10,76 \text{ lux}$$

$$1 \text{ lux} = 92,96 \times 10^{-3} \text{ foot-candle}$$

$$1 \text{ lux} = 3,252 \text{ W.m}^{-2}$$

Berdasarkan hasil penelitian dengan menggunakan perbedaan hari didapatkan hasil bahwa intensitas matahari mempengaruhi perubahan suhu, dan peningkatan nilai perubahan suhu mempengaruhi kecepatan putar (rpm). Semakin meningkat intensitasnya maka nilai perbedaan suhu yang dihasilkan juga semakin meningkat, dan semakin meningkat nilai perbedaan suhu maka kecepatan putar (rpm) yang dihasilkan juga akan semakin meningkat.

Hubungan kecepatan putar dengan torsi tidaklah selalu linier (). Dari percobaan yang telah dilakukan didapatkan hasil yang naik turun. Itu karena rentan nilai torsi sangat kecil. Pada percobaan ini alat ukur yang digunakan 2 buah neraca pegas dengan sistem pengereman.

Rata-rata efisiensi yang dihasilkan oleh mesin Stirling adalah 11% pada setiap percobaannya. Efisiensi rata-rata yang dihasilkan oleh generator adalah 0.05%. Nilai efisiensi yang dihasilkan oleh mesin Stirling sangat kecil sehingga berpengaruh pada nilai efisiensi generator. Efisiensi generator sebesar 0.05%

sudah dapat digunakan menyalakan LED berwarna hijau, meskipun nyala lampu yang dihasilkan masih redup.

Nilai intensitas matahari yang tidak konstan disebabkan oleh faktor lingkungan, misalnya angin dan adanya kebocoran panas pada reservoir mesin stirling. Desain mesin stirling juga masih perlu dikembangkan sehingga diharapkan dapat menghasilkan nilai efisiensi yang lebih tinggi.



BAB V KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil perhitungan dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Nilai intensitas matahari berbanding lurus dengan nilai perubahan suhu pada mesin Stirling. Semakin meningkat nilai intensitas matahari maka nilai perubahan suhu juga akan semakin meningkat.
2. Nilai perubahan suhu mempengaruhi kecepatan putar pada mesin Stirling. Semakin meningkat perbedaan suhu yang dihasilkan maka kecepatan putar yang akan dihasilkan juga akan semakin meningkat.
3. Efisiensi diperoleh dengan membandingkan daya output dengan daya input. Efisiensi tertinggi didapatkan 12,1% pada intensitas 834 W/m² dengan perbedaan suhu 120°C, kecepatan putar 139 rad/sP dengan daya generator yang dihasilkan yaitu 0.004 Watt. Rata-rata efisiensi generator yang dihasilkan adalah 0.05%, yang dapat digunakan untuk menyalakan LED berwarna hijau.

5.2 Saran

Penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, beberapa saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya antara lain:

1. Perlu pengembangan lebih lanjut dalam hal desain mesin Stirling

2. Untuk penelitian lebih lanjut sebaiknya dilakukan pengecekan alat dan dokumentasi peralatan sebelum dan sesudah pengujian sehingga dapat diketahui dampak yang terjadi terhadap komponen dan hasil penelitian yang baik
3. Pertambahan dan perbaikan variabel pengukuran agar hasilnya lebih teliti lagi
4. Perlu ada alat untuk mengukur putaran (rpm) dan torsi secara otomatis agar hasilnya lebih baik lagi.



DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, Kamarudin dkk. 1998. *Energi dan Listrik Pertanian Bogor*: Institut Pertanian Bogor.
- Al-Hifnawi, Muhammad Ibrahim. 2008. *Tafsir Al-Qurtubhi*. Jakarta: Pustaka Azam.
- Al-Qarni, 'Aidh. 2008. *Tafsir Muyassar*. Jakarta: Qisthi Press.
- Al-Qurtubi, Syaikh imam. 2008, "Tafsir Al Qurtubi". Yang diterjemahkan dari judul aslinya "Al Jami' li Ahkaam Al-Qur'an" oleh Sudi Rosadi, Fathurrahman, Ahmad Hotib; editor, M. Ikbal Kadir. Jakarta: Pustaka Azzam.
- Cengel, Yunus A. 2003. *Heat Transfer-A Partical Approach 2th edition*. New York: Mc Graw-Hill inc.
- Damanik, Asan. 2011. *Fisika Energi*. Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma.
- Dyayadi, MT. 2008. *Alam Semesta Bertawaf*. Yogyakarta: Lingkaran.
- Faqih, Allamah Kamal. 2005. *Tafsir Nuzul Qur'an jilid VII*. Jakarta: Al Huda.
- Giancoli, Douglass C. 2001. *Fisika Edisi Kelima Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Halliday, David. 1998. *Fisika Jilid 1 jilid ketiga*. ITB: Erlangga.
- Holman, J.P. 1994. *Perpindahan Kalor*. Jakarta: Erlangga.
- Ishaq, Mohammad. 2007. *Fisika Dasar Edisi 2*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Maier, Cristpoh. 2007. *Stirling Engine*. University of Giavle.
- Miller, Gary, dkk. 2008. *Keajaiban Al-Qur'an Dalam Telaah Sains Modern*. Yogyakarta: Media Ilmu.
- Moran Michael J dan Shapiro Howard N. 2003. *Termodinamika Teknik Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Rizki, Ahda. 2013. *Unjuk kerja Stirling Tipe Gamma 40cc Terhadap Variasi Tekanan*. Jember: Universitas Jember.
- Shihab, M. Quraish. 2003. *Tafsir Al-Misbah Pesan, Kesan dan Keserasian Al Qur'an volume 6*. Jakarta: Lentera Hati.

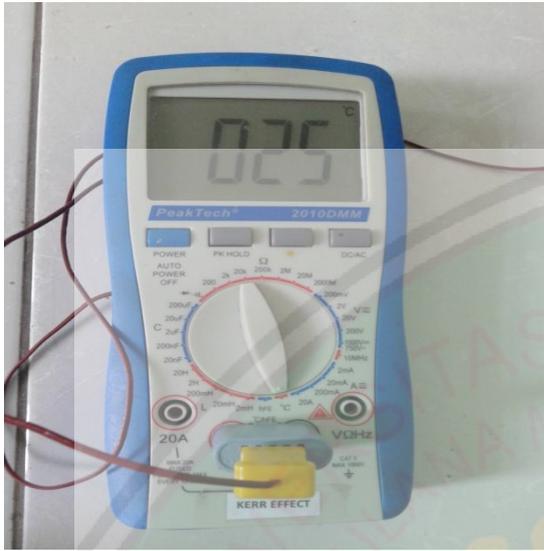
- Snyman, CS. 2008. *Design Analysis Methods for Stirling Engines*. Department of Mechanical and Mechatronic Engineering. South Afrika: University of Stellenbosch.
- Suparno, Paul. 2009. *Pengantar Termofisika*. Yogyakarta: Universitas Sanata Dharma.
- Try, Januar N. 2013. *Perancangan dan Pembuatan Alat Peraga Mesin Stirling di SMK PGRI 1 Surakarta*. Yogyakarta: Universitas Atma Jaya Jogjakarta.
- Vineeth, CS. *Stirling Engine Beginner Guide*. Thiruvananthapuram: Department of Mechanical Engineering.
- Walker G, Khan MI. 1965. *Theoretical performance of Stirling cycle engine, paper no. 949A*. Proceedings of SAE International Automotive Congress, Detroit.
- Wardhana, Frodierman. 2004. *Al-Qur'an dan Energi Nuklir*. Yogyakarta: Pustaka pelajar.
- Zuhal. 1998. *Dasar Teknik Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta: Gramedia.
- Zemansky, Mark W dan Dittman, Richard H. 1986. *Kalor dan Termodinamika*. Bandung: ITB.



LAMPIRAN

Lampiran 1

Dokumentasi Alat Penelitian



1. Thermokopel



5. Luxmeter



2. Stopwatch



6. Penyangga



3. Gergaji



7. Obeng



4. Neraca Pegas



8. LED



5. Generator



9. Tachometer

Lampiran 2

Tabel 2.1 Hasil pengukuran data hari pertama

intensitas (W/m ²)	suhu dingin (°C)	suhu panas (°C)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)	Voltase (Volt)
629	33	103	104	0.0052	0.013
629	33	104	104	0.0052	0.014
698	35	110	104	0.0052	0.043
716	35	111	105	0.0054	0.046
734	35	113	113	0.0058	0.06
766	35	116	115	0.0059	0.072
755	35	119	117	0.0059	0.088
800	36	125	117	0.0059	0.089
814	36	130	120	0.0059	0.09
834	37	150	126	0.0063	0.108
851	37	153	129	0.0065	0.118
873	37	155	133	0.0066	0.146
879	38	163	133	0.0066	0.204
891	38	184	135	0.0068	0.209
940	38	186	144	0.0075	0.219

Tabel 2.2 Hasil pengukuran data hari kedua

Intensitas (W/m ²)	suhu dingin (°C)	suhu panas (°C)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)	Voltase (Volt)
649	36	113	84	0.04	0.04
670	37	121	92	0.05	0.116
688	37	122	94	0.05	0.14
791	37	122	102	0.05	0.144
755	38	125	120	0.05	0.145
800	38	127	127	0.05	0.154
804	39	135	127	0.06	0.163
832	39	138	129	0.06	0.165
834	40	142	138	0.06	0.197
835	40	143	138	0.07	0.208
836	40	145	138	0.07	0.22
851	40	146	142	0.07	0.228
1012	41	153	156	0.07	0.31
940	42	161	149	0.08	0.343
1092	42	165	166	0.08	0.365

Tabel 2.3 Hasil pengukuran data hari ketiga

Intensitas (W/m	suhu dingin (°C)	suhu panas (°C)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)	Voltase (Volt)
624	31	101	80	0.004	0.04
735	31	102	92	0.004	0.0465
763	31	106	101	0.004	0.118
755	32	109	122	0.004	0.14
787	32	110	122	0.005	0.164
794	34	111	125	0.005	0.165
800	34	116	128	0.005	0.204
824	35	146	129	0.005	0.209
834	35	155	139	0.005	0.219
839	36	160	139	0.006	0.23
845	36	163	143	0.006	0.29
940	36	166	145	0.006	0.303
955	36	169	150	0.007	0.31
960	36	185	152	0.007	0.343
989	37	204	153	0.007	0.97

Lampiran 3

3.1 Data perhitungan hari pertama

Intensitas (W/m ²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)	Daya Mesin (Watt)	Efisiensi Mesin (%)	Luas Penampang Mesin (A)	Daya Masukan (Pin)	Voltase (Volt)	V ²	Daya generator (Watt)	Efisiensi Generator (%)
755	84	117	0.0059	0.6903	10.50925	0.0087	6.5685	0.088	0.007744	0.00067929	0.01034175
800	89	129	0.0059	0.7611	10.93534	0.0087	6.96	0.09	0.0081	0.00071052	0.01020871
834	113	126	0.0063	0.7938	10.94021	0.0087	7.2558	0.108	0.011664	0.00102315	0.01410124
851	116	139	0.0063	0.8757	11.82787	0.0087	7.4037	0.209	0.043681	0.00383166	0.05175340
940	148	144	0.0065	0.936	11.44534	0.0087	8.178	0.219	0.047961	0.00420710	0.05144418

3.2 Data perhitungan hari kedua

Intensitas (W/m ²)	ΔT (°C)	Rpm (Ra/s)d	Torsi (N.m)	Daya mesin (Watt)	Luas penampang mesin (A)	Daya masukan (Pin)	Efisiensi mesin (%)	Voltase (Volt)	V ²	Daya generator (Watt)	Efisiensi generator (%)
755	87	120	0.0063	0.756	0.0087	6.5685	11.509	0.09	0.0081	0.000711	0.010817
800	89	127	0.0064	0.8128	0.0087	6.96	11.678	0.109	0.011881	0.001042	0.014974
834	102	138	0.0063	0.8694	0.0087	7.2558	11.982	0.21	0.0441	0.003868	0.053315
851	106	142	0.0059	0.8378	0.0087	7.4037	11.315	0.21	0.0441	0.003868	0.05225
940	119	149	0.0058	0.8642	0.0087	8.178	10.567	0.22	0.0484	0.004246	0.051915

3.3. Data Perhitungan hari ketiga

Intensitas (W/m ²)	ΔT (°C)	Rpm (Rad/s)	Torsi (N.m)	Daya mesin (Watt)	Luas penampang mesin (A)	Daya masukan (Pin)	Efisiensi mesin (%)	Voltase (volt)	V ²	Daya generator (Watt)	Efisiensi generator (%)
755	77	122	0.0063	0.768	0.0087	6.5685	11.70	0.1	0.01	0.000877	0.0133545
800	82	128	0.0064	0.819	0.0087	6.96	11.77	0.118	0.0139	0.001221	0.0175489
834	120	139	0.0063	0.875	0.0087	7.2558	12.06	0.211	0.0445	0.003905	0.0538238
851	127	145	0.006	0.87	0.0087	7.4037	11.75	0.155	0.0240	0.002107	0.0284649
940	130	150	0.0063	0.945	0.0087	8.178	11.55	0.222	0.0492	0.004323	0.0528632





KEMENTERIAN AGAMA RI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI (UIN) MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Gajayana No. 50 Dinoyo Malang (0341) 551345 Fax. (0341) 572533

BUKTI KONSULTASI SKRIPSI

Nama : Zulfi Farida Alfianti
NIM : 12640006
Fakultas/Jurusan : Sains dan Teknologi/Fisika
Judul Skripsi : Desain dan Pembuatan Mesin Stirling Tenaga Matahari Dengan Memanfaatkan Pemanas Matahari Tipe Box Untuk Pembangkit Listrik
Pembimbing I : Farid Samsu Hananto, M.T
Pembimbing II : Umayyatus Syarifah, M.A

No	Tanggal	HAL	Tanda Tangan
1	11 Februari 2016	Konsultasi Bab I, II, dan III	
2	14 Februari 2016	Konsultasi Kajian Agama Bab I, II	
3	26 Februari 2016	Konsultasi Bab I, II, III dan ACC	
4	31 Mei 2016	Konsultasi Data dan Pengolahan Data	
5	1 Juni 2016	Konsultasi Bab IV dan V	
6	6 Juni 2016	Konsultasi Kajian Agama Bab IV	
7	11 Juni 2016	Konsultasi IV, V dan ACC	
8	20 Juni 2016	Konsultasi revisi agama Bab I, II dan IV	
9	31 Juni 2016	Konsultasi Agama Bab I, II, IV dan ACC	
10	5 Juli 2016	Konsultasi semua Bab, Abstrak dan ACC	

Malang, 6 September 2016
Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika



Erna Hastuti, M.Si
NIP. 19811119 200801 2 009