

TUGAS AKHIR

ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBANGKIT LISTRIK HOT AIR STIRLING ENGINE DENGAN BAHAN BAKAR METANOL

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Elektro Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

BASUENDRO PUTRO
1407220078



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2019**

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

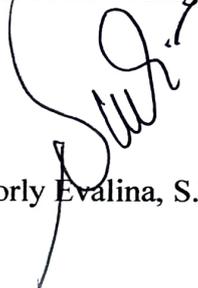
Nama : Basuendro Putro
NPM : 1407220078
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine dengan Bahan Bakar Metanol

Telah berhasil dipertahankan di hadapan tim penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro , Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 01 Oktober 2019

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing I / Penguji



Noorly Evalina, S.T.,M.T

Dosen Pembimbing II / Penguji



Zulfikar, S.T.,M.T

Dosen Pembanding I / Penguji



Dr. Ir. Surya Hardi, M.Sc

Dosen Pembanding II / Penguji



Rohana, S.T.,M.T



SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Basuendro Putro
Tempat /Tanggal Lahir : Jakarta / 09 Januari 1997
NPM : 1407220078
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Elektro

menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Dengan Bahan Metanol”

bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinal dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 01 Oktober 2019

Saya yang menyatakan,



Basuendro Putro

ABSTRAK

Mesin stirling merupakan suatu mesin kalor yang digerakkan melalui siklus kompresi dan ekspansi pada fluida kerja dalam wujud gas. Pada prinsip kerjanya ada 3 tipe mesin stirling yaitu tipe Alpha, Beta dan tipe Gamma. Secara Umum Skema Kerja Mesin ini, pada suhu yang berbeda fluida kerja terjadi perbedaan tekanan yang dapat menimbulkan perubahan energi panas menjadi energi kerja mekanik yang akan menggerakkan roda *flywheel* yang dihubungkan dengan generator DC sehingga dapat menimbulkan energi listrik. Bahan yang digunakan adalah Metanol yang dapat diperbaharui sehingga dapat menghemat bahan bakar fosil yang masih tersedia. Listrik yang dihasilkan kemudian dapat digunakan setelah melalui *joule thief inverter* dan dapat diterima pada lampu 3 watt AC.

Kata Kunci: *Stirling Engine, Metanol, Joule Thief Inverter*

ABSTRACT

Stirling engine is a heat engine that is driven through a cycle of compression and expansion of the working fluid in the form of gas. In principle, there are 3 types of stirling engines, namely Alpha, Beta and Gamma types. In general, the Machine Work Scheme, at different temperatures the working fluid occurs a difference in pressure that can cause changes in heat energy into mechanical work energy that will drive the flywheel wheel which is connected to a DC generator so as to cause electrical energy. The material used is renewable methanol so that it can save fossil fuels that are still available. The electricity generated can then be used after going through a joule thief inverter and can be received on a 3 watt AC lamp.

Keyword : *Striling Engine, Metanol, Joule Thief Inverter*

KATA PENGANTAR



Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini yang berjudul “**ANALISIS KARAKTERISTIK PEMBANGKIT LISTRIK HOT AIR STIRLING ENGINE DENGAN BAHAN BAKAR METANOL MENGGUNAKAN BEBAN LISTRIK BOLAK BALIK**” sebagai syarat untuk meraih gelar akademik Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara (UMSU), Medan.

Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Allah SWT, karena atas berkah dan izin-Nya saya dapat menyelesaikan tugas akhir dan studi di Fakultas Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Orangtua penulis: Wisnu Busono dan Emma Andriana, yang telah bersusah payah membesarkan dan membiayai studi penulis.
3. Adik penulis: Dyan Wulandari Putri dan Prasetyo Seto Putro, yang telah memberikan semangat.
4. Bapak Faisal Irsan Paasaribu S.T., M.T selaku ketua Prodi Teknik Elektro fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

5. Bapak Partaonan Harahap S.T., M.T. selaku Sekertaris Prodi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara
6. Ibu Noorly Evalina S.T.,M.T. selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
7. Bapak Zulfikar ST.,M.T. selaku Dosen Pimbimbing II yang telah banyak membimbing dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Seluruh Bapak/Ibu Dosen Diprogram Studi Teknik Elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknikelektroan kepada penulis.
9. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
10. Rekan-rekan : Iskandar M Saidi, Tri Rizky Lubis, Anggi Juliansyah, Ardianto Hakim, Rahmad Arfan Pangabean, Juli Darmawan dan lainnya yang tidak mungkin nama nya disebut satu persatu.

Laporan Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis dimasa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi dunia Elektro.

Medan, September 2019
Penulis

(Basuendro Putro)
1407220078

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	4
1.6 Metodologi Penelitian	4
1.7 Sistematika Penulisan	5
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Tinjauan Pustaka Relevan	6
2.2 Landasan Teori	7
2.2.1 Hukum Termodinamika I	7
2.2.2 Hukum Termodinamika II	8

2.2.3 Proses	10
2.2.4 Perpindahan Panas	11
2.2.5 Mesin Kalor.....	14
2.2.6 Efisiensi.....	15
2.2.7 Mesin Carnot.....	15
2.3 Pengertian Stirling Engine	16
2.4. Sejarah Pengembangan Stirling Engine	18
2.5 Prinsip Kerja Stirling Engine	20
2.6 Jenis – Jenis Stirling Engine	22
2.7 Siklus Stirling Engine	25
2.8 Suhu (Temperatur)	27
2.9 Generator Direct Current (DC)	28
2.10 Metanol	30
2.11 Inverter	31
2.12 Joule Thief Inverter	35
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	38
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	38
3.2 Bahan Dan Peralatan Penelitian	38
3.2.1 Bahan Penelitian	38
3.2.2 Peralatan Penelitian	40
3.3 Metodologi Penelitian	40
3.4 Variabel Data	42
3.5 Jalannya Penelitian	42

3.6 Langkah Kerja Penelitian.....	42
3.7 Gambar Alat dan Bahan Penelitian.....	44
3.8 Flow Chart/Diagram Alir Penelitian.....	48
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Analisis Karakteristik Hot Air Stirling	49
4.2 Analisis Perhitungan Daya dan Faktor kerja/Faktor Daya	50
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	60
5.1 Kesimpulan	60
5.2 Saran	60
Daftar Pustaka.....	61
Lampiran	63

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 4.1 Hasil Output Pengujian Tanpa Beban Lampu 3 Watt	49
Tabel 4.2 Hasil Output Pengujian Dengan Beban Lampu 3 Watt	49

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Sistem Pembakaran Stirling Engine	17
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Stirling Engine	21
Gambar 2.3 Stirling Engine Alfa	23
Gamabr 2.4 Stirling Engine Beta	24
Gambar 2.5 Stirling Engine Gamma	24
Gambar 2.6 Diagram P-V dan T-S	25
Gambar 2.7 Generator Penguat Terpisah	28
Gambar 2.8 Karakteristik Generator Penguat Terpisah	29
Gambar 2.9 Tegangan AC Kotak 2-Level	32
Gambar 2.10 Tegangan AC Kotak 3-Level	32
Gambar 2.11 Tegangan AC Kotak 6-Level	33
Gambar 2.12 Contoh Gambar Rangkaian Inverter	33
Gambar 2.13 Prinsip Kerja Inverter	35
Gambar 2.14 Rangkaian Joule Thief Sederhana	36
Gambar 3.1 Sistem Blok Diagram Penelitian	
Gambar 3.2 Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Menggunakan Bahan Bakar Metanol.....	41
Gambar 3.3 Multimeter Digital.....	44
Gambar 3.4 Tachometer.....	44
Gambar 3.5 Termometer	45

Gambar 3.6 Lampu 3 Watt (Beban)	45
Gambar 3.7 Kotak Pelindung Joule Thief Inverter	46
Gambar 3.8 Joule Thief Inverter	46
Gambar 3.9 Metanol	47
Gambar 3.10 Flow Chart/Diagram Alir	48

DAFTAR GRAFIK

	Halaman
Grafik 4.1 Grafik Analisi Hot Air Stirling Tanpa Beban.....	54
Grafik 4.2 Grafik Analisi Hot Air Stirling Dengan Beban	59
Grafik 4.3 Grafik Tegangan Rata-rata Pembangkit Hot air Stirling	56
Grafik 4.4 Grafik Arus Rata-rata Pembangkit Hot Air Stirling	56

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring dengan kemajuan teknologi saat ini, perangkat listrik pada awalnya membutuhkan energi yang besar, secara bertahap mulai berganti dengan perangkat hemat listrik dan lebih ramah lingkungan. Upaya untuk konservasi (penghematan) listrik kemungkinan besar akan terus berkembang. Ketersediaan energi listrik yang diberikan tidak seimbang dengan kebutuhan seiring dengan pertumbuhan gaya hidup masyarakat pada umumnya [1].

Untuk memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, maka perlu dikembangkan berbagai pembangkit listrik seperti *stirling engine* yang ditemukan oleh Robert Stirling (1790-1876) pada tahun 1816. Motor *stirling* adalah jenis motor yang memiliki ciri pembakaran luar (*external combustion engine*) dan membutuhkan sumber energi termal untuk menggerakkannya atau dengan kata lain multi bahan bakar [2].

Berbagai cara telah dilakukan untuk mencari bahan bakar alternatif sebagai pengganti dari bahan bakar fosil. Dimana diharapkan bahan bakar alternatif tersebut tetap dapat memberikan performa yang baik dan tentunya emisi gas buang yang dihasilkan ramah terhadap lingkungan. Dengan bahan bakar fosil yang semakin lama semakin menipis, bahan bakar spirtus dapat dijadikan sebagai sumber energi baru karena spiritus adalah sumber energi yang dapat diperbaharui [3].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis sebuah pembangkit listrik DC motor *stirling* dengan kapasitas 1 Volt DC sampai 3 Volt DC dengan

menggunakan rangkaian *joule thief inverter* untuk dibebani dengan beban listrik AC (bolak – balik). Dalam proses menganalisis sebuah pembangkit listrik motor *stirling* yang telah dibebani listrik bolak – balik, dibutuhkan rangkaian *joule thief inverter*, yang akan menaikkan dan mengkonversi tegangan DC menjadi AC. Proses perancangan rangkaian *joule thief inverter* tersebut meliputi proses perhitungan tegangan dan arus output yang nantinya dijadikan sebagai acuan dalam pemilihan komponen tambahan untuk menyesuaikan output yang keluar dari pembangkit listrik tersebut. Setelah pembangkit listrik motor *stirling* selesai dibuat dan telah dihubungkan dengan *joule thief inverter*, kegiatan penelitian selanjutnya adalah pengujian. Parameter-parameter yang akan diuji diantaranya karakteristik tegangan (volt), arus (i), dan faktor daya ($\cos \phi$) dari pembangkit listrik *hot air stirling engine* bila menggunakan beban listrik bolak-balik.

Dengan demikian, perlu adanya inovasi baru untuk membuat pembangkit listrik mesin *stirling* dengan memanfaatkan energi terbarukan yang dapat menghasilkan arus dan tegangan yang sesuai dengan kebutuhan, Maka dari itu penulis bermaksud untuk mengangkat skripsi yang berjudul ***“Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik Hot Air Stirling Engine Dengan Bahan Bakar Metanol (Spiritus) Menggunakan Beban Listrik Bolak-Balik”***.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun yang menjadi rumusan masalah dalam penyusunan skripsi ini adalah:

1. Menganalisis arus dan tegangan yang dihasilkan apabila pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter* diberi beban dan tidak diberi beban.
2. Menganalisis faktor kerja/faktor daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter* diberi beban.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah diatas, maka tujuan penulisan ini adalah :

1. Menganalisis karakteristik arus dan tegangan yang dihasilkan apabila pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter* diberi beban dan tidak diberi beban.
2. Menganalisis seberapa besar faktor kerja/faktor daya dari pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter* diberi beban.

1.4 Batasan Masalah

Permasalahan pada penulisan ini akan dibatasi pada :

1. Penggunaan bahan bakar *methanol* (spiritus)
2. Penggunaan beban listrik bolak balik dengan lampu LED 3 watt
3. Perhitungan output pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter* diberi beban dan tidak diberi beban.

4. Perhitungan tingkat faktor daya terhadap beban listrik bolak-balik dari pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihubungkan *joule thief inverter*.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat di ambil dari penulisan skripsi ini adalah :

1. Bagi mahasiswa dapat di jadikan sebagai refrensi untuk mengembangkan pembangkit listrik *stirling engine*.
2. Untuk umum diharapkan dapat menjadi energi alternatif pemanfaatan bahan bakar *methanol* (spiritus) menjadi energi listrik yang bisa dimanfaatkan bagi kebutuhan masyarakat.
3. Mengurangi pemakaian bahan bakar fosil yang tidak dapat diperbaharui lagi.

1.6 Metodologi Penelitian

Metodologi penelitian terdiri atas :

1. Studi Literatur

Dilakukan untuk mempelajari bahan pustaka yang berkaitan dengan permasalahan penelitian.

2. Pengujian dan analisis

Pengujian merupakan metode untuk memperoleh data dari beberapa bagian perangkat keras dan perangkat lunak sehingga dapat diketahui apakah sudah dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan, Selain itu pengujian juga digunakan untuk mendapatkan hasil dan mengetahui kemampuan kerja dari sistem.

1.7 Sistematika Penulisan

Penulisan ini tersusun atas beberapa bab pembahasan. Sistematika penulisan tersebut adalah sebagai berikut :

BAB I : PENDAHULUAN

Pada bab ini menguraikan secara singkat latar belakang, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah dan metodologi penelitian.

BAB II : TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini berisikan tentang pandangan umum tentang sistem pembangkit listrik *hot air stirling engine* dibeban listrik bolak-balik.

BAB III : METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan menerangkan tentang alat dan bahan penelitian, data penelitian, jalannya penelitian, diagram alir/ *flowchart*,sertahal – hal lain yang berhubungan dengan penelitian.

BAB IV : PEMBAHASAN DAN ANALISIS

Pada bab ini berisi tentang perhitungan karakteristik arus dan tegangan serta perhitungan faktor kerja pada pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dibebani beban listrik bolak-balik.

BAB V : PENUTUP

Pada bab ini berisikan tentang kesimpulan dan saran dari penulisan skripsi.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tinjauan Pustaka Relevan

Mesin stirling merupakan mesin dengan jenis pembakaran luar dengan siklus tertutup yang mengubah energi panas menjadi energi gerak dengan menggunakan udara atau gas sebagai *fluida* kerjanya. Mesin stirling dapat membakar setiap bahan bakar padat atau cairan sebagai sumber pemanasnya. Hal ini menyebabkan mesin stirling sangat menarik, khususnya pada situasi dimana bahan bakar konvensional sangat mahal dan sulit untuk memperolehnya. Pada dasarnya sistem pembangkit listrik dengan generator stirling mempunyai beberapa komponen untuk membangkitkan sebuah beban yang akan menghasilkan tegangan, arus, dan daya. Dalam hal ini pengaruh energi panas menjadi salah satu faktor utama dalam penentuan bentuk dan jenis dari mesin stirling yang akan digunakan agar keluaran daya listrik dan tingkat kestabilan dari putaran pada mesin stirling menjadi maksimal [3].

Salah satu energi yang dibutuhkan manusia adalah energi listrik, namun ketersediaan energi ini tidak tercukupi dengan *suplay* bahan bakar pembangkit energi listrik yaitu bahan bakar fosil atau energi fosil. Ketersediaan bahan bakar fosil di dunia setiap tahun mengalami kenaikan, sehingga memaksakan kita untuk mencari bahan bakar atau energi alternatif pengganti bahan bakar fosil. Salah satu energi alternatifnya adalah pemanfaatan senyawa kimia *methanol (spiritus)* listrik dengan teknologi yang bekerja dengan prinsip mengkonversi langsung energi panas menjadi energi listrik. *Metanol* merupakan senyawa alkohol dengan rumus kimia CH_3OH . *Metanol* merupakan bentuk alkohol paling sederhana. Pada keadaan

atmosfer berbentuk cairan yang mudah menguap, tidak berwarna, mudah terbakar, dan beracun dengan bau yang khas (berbau lebih ringan dari *etanol*). *Metanol* digunakan sebagai bahan pendingin anti beku, pelarut, bahan bakar dan sebagai bahan additive bagi industri *etanol* [4].

2.2 Landasan Teori

Termodinamika adalah ilmu yang mempelajari perpindahan energi ketika suatu sistem mengalami proses termodinamika dari suatu keadaan-keadaan lain [5]. Berbagai aplikasi teknik yang menunjukkan pentingnya prinsip-prinsip termodinamika teknik seperti pada sistem energi alternatif, pembangkit listrik, sistem pendingin, pompa kalor merupakan system-sistem yang menghasilkan suatu konversi energi.

2.2.1 Hukum Termodinamika I

Bunyi hukum Termodinamika I adalah “Energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, melainkan hanya dapat diubah bentuknya saja” [5]. Jika selama gas mengalami suatu proses maka ada beberapa peristiwa yang dapat terjadi, seperti :

- 1) Energi dalam yang dimiliki gas berubah.
- 2) Muncul kerja yang dilakukan oleh gas atau yang dilakukan oleh lingkungan.
- 3) Ada pertukaran kalor antara gas dan lingkungan. Peristiwa yang terjadi dalam hukum termodinamika pertama menjelaskan bahwa terjadi interaksi antara sistem dan lingkungan.

Dalam hukum termodinamika pertama dijelaskan bahwa perubahan energi dalam dalam sistem yang tertutup, ΔT ($^{\circ}\text{C}$), akan sama dengan kalor yang ditambahkan ke sistem dikurangi kerja yang dilakukan oleh sistem dalam bentuk persamaan:

$$\Delta T = Q - W \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana :

Q = kalor total yang ditambahkan ke sistem (Joule/ kalori) dan,

W = usaha kerja total yang dilakukan (Joule/ kalori). m merupakan kerja yang dilakukan oleh sistem, maka jika kerja dilakukan pada sistem, m akan negatif dan t akan bertambah. Energi dalam dalam hal ini berpengaruh pada kalor yang diserap oleh sistem dan usaha yang dilakukan oleh sistem itu sendiri.

ΔT = kenaikan suhu

Hukum pertama termodinamika adalah sebuah persamaan kekekalan energi yang menyatakan bahwa satu-satunya jenis energi yang berubah dalam sistem adalah energi dalam. Dalam hal ini, tidak ada perpindahan energi berupa kalor dan usaha yang diberikan pada sistem bernilai nol, oleh sebab itu energi dalamnya konstan. Sehingga dapat disimpulkan pada keadaan ini energi dalam bersifat tetap atau konstan [6].

2.2.2 Hukum Termodinamika II

Hukum kedua termodinamika dinyatakan dengan entropi. Pada hukum pertama, energi dalam digunakan untuk mengenali perubahan yang

diperbolehkan sedangkan pada hukum kedua entropi digunakan mengenali perubahan spontan di antara perubahan-perubahan yang diperbolehkan ini. Hukum kedua berbunyi entropi suatu sistem bertambah selama ada perubahan spontan.

Proses irreversibel (seperti pendinginan hingga mencapai temperatur yang sama dengan lingkungan dan pemuaiian bebas dari gas) adalah proses spontan, sehingga proses itu disertai dengan kenaikan entropi. Proses irreversibel menghasilkan entropi, sedangkan proses reversibel adalah perubahan yang sangat seimbang, dengan sistem dalam keseimbangan dengan lingkungannya pada setiap tahap. Proses reversibel tidak menghasilkan entropi, melainkan hanya memindahkan entropi dari suatu bagian sistem terisolasi ke bagian lainnya.

Sifat atau keadaan perilaku partikel dinyatakan dalam besaran entropi, entropi didefinisikan sebagai bentuk ketidakteraturan perilaku partikel dalam sistem. Entropi didasarkan pada perubahan setiap keadaan yang dialami partikel dari keadaan awal hingga keadaan akhirnya.

Semakin tinggi entropi suatu sistem, semakin tidak teratur pula sistem tersebut, sistem menjadi lebih rumit, kompleks, dan sulit diprediksi. Untuk mengetahui konsep keteraturan, mula-mula kita perlu membahas hukum kedua termodinamika yang dikenal sebagai ketidaksamaan Clausius dan dapat diterapkan pada setiap siklus tanpa memperhatikan dari benda mana siklus itu mendapatkan energi melalui perpindahan kalor. Ketidaksamaan Clausius mendasari dua hal yang digunakan untuk menganalisis sistem tertutup dan volume atur berdasarkan hukum kedua termodinamika yaitu sifat entropi dan neraca entropi.

2.2.3 Proses

Proses adalah peristiwa perubahan keadaan gas dari satu keadaan awal ke satu keadaan akhir. Misalkan mula-mula keadaan gas di ungkapkan oleh variabel-variabel P_1 , V_1 , dan T_1 . Jika pada keadaan selanjutnya nilai variable tersebut adalah P_2 , V_2 , dan T_2 , maka dikatakan gas telah melewati suatu proses. Saat terjadinya sebuah proses umumnya akan terjadi perubahan energi didalam gas dan terjadi pertukaran antara gas dan lingkungan. Berdasarkan dengan masalah pertukaran ini, dapat di bagi beberapa jenis proses berikut ini:

a) Proses *Adiabatik*

Adalah proses yang tidak terjadi pertukaran kalor antara sistem dan lingkungan. Proses *adiabatik* dapat terjadi jika sistem dan lingkungan dibatasi oleh sekat yang tidak dapat dilalui kalor. Dalam hal ini sistem yang tertutup tidak berarti dapat dikatakan sebagai adiabatik, proses ini hanya jika kalor tidak dapat melalui pembatas atau sekat. Contoh sekat yang sulit dilewati kalor adalah dinding termos air panas.

b) Proses *Isokhorik*

Adalah proses yang berlangsung pada volume tetap. Jika digambarkan pada diagram P-V, kurva proses *Isokhorik* adalah kurva tegak. Proses *isokhorik* adalah dimana ketika dalam sebuah proses berlangsung volumenya konstan atau tidak mengalami perubahan.

c) Proses *Isotermal*

Proses *isothermal* adalah proses yang berlangsung pada suhu konstan. Contoh proses ini adalah proses yang berlangsung dalam wadah logam dimana wadah tersebut dicelupkan dalam air yang volumenya sangat besar. Karena

volume air yang sangat besar, maka selama proses berlangsung suhu air dapat dianggap konstan sehingga suhu gas dalam wadah juga dianggap konstan. Juga proses ini dapat dihasilkan dengan memasang pemanas otomatis yang bisa mengontrol suhu sehingga konstan.

d) Proses *Isobarik*

Pada proses *isobarik* adalah proses yang berlangsung pada tekanan konstan. Jika digambarkan pada diagram P-V, kurva proses Isobarik adalah kurva mendatar. Contoh proses ini adalah proses yang berlangsung dalam wadah yang dilengkapi sebuah *piston* dibagian atasnya. *Piston* tersebut dapat bergerak. *Piston* mendapat tekanan dari udara luar (*atmosfer*) sehingga nilainya konstan. Dengan demikian, tekanan dalam gas juga konstan [6].

2.2.4 Perpindahan Panas

Perpindahan Kalor (*Heat Transfer*) adalah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara benda atau material. Dimana energi yang dipindah itu dinamakan kalor (*Heat*). Kalor diketahui dapat berpindah dari tempat lebih tinggi ke temperature yang lebih rendah. Hukum percampuran kalor dapat terjadi karena kalor itu berpindah, sedangkan pada calorimeter, perpindahan kalor tidak saja mengubah temperatur atau fasa zat suatu benda secara lokal, melainkan kalor itu merambat dari suatu bagian atau dari bagian lain.

Menurut penelitian, perpindahan tenaga kalor dapat dibagikan dalam beberapa golongan perpindahan, kalor itu dapat merambat dari suatu bagian kebagian yang lain melalui zat atau benda yang diam, kalor juga dapat dibawa oleh partikel-partikel yang mengalir. Pada radiasi kalor, tenaga berpindah melalui

pancaran yang merupakan juga satu cara perpindahan kalor. Umumnya perpindahan kalor melalui cara melalui cara pertama disebut perpindahan kalor melalui konduksi, cara kedua perpindahan kalor melalui konveksi dan cara ketiga melalui radiasi.

a. Konduksi

Kalor dari suatu bagian benda bertemperatur lebih tinggi akan mengalir melalui zat benda itu kebagian lainnya yang bertemperatur lebih rendah. Zat atau partikel zat dari benda yang dilalui kalor ini sendiri tidak mengalir sehingga kalor ini berpindah dari satu partikel ke partikel dan mencapai bagian yang dituju. Perpindahan kalor cara ini disebut konduksi dan itu mempunyai sifat konduksi kalor. Konduksi Kalor ini bergantung kepada zat yang dilaluinya dan juga kepada distribusi temperatur dari bagian benda. Berlangsungnya konduksi kalor melalui zat dapat diketahui perubahan yang terjadi. Perpindahan panas secara konduksi tidak hanya terjadi pada padatan saja tetap bisa juga terjadi pada cairan ataupun gas, hanya saja konduktivitas terbesar ada pada padatan jadi : Konduktivitas padatan > Konduktivitas cairan dan gas.

Jika media perpindahan panas konduksi berupa gas, molekul-molekul gas yang suhunya tinggi akan bergerak dengan kecepatan lebih tinggi dari pada molekul gas yang suhunya lebih rendah. Jika media perpindahan panas konduksi berupa cairan, mekanisme perpindahan panas yang terjadi sama dengan konduksi dengan media gas. Tetapi jarak antara molekul-molekul pada cairan lebih pendek dari pada jarak antara molekul-molekul pada fase gas [13].

b. Konveksi

Perpindahan panas konveksi adalah proses perpindahan panas dimana cairan atau gas yang suhunya lebih tinggi mengalir ke tempat yang suhunya lebih rendah, memberikan panas pada permukaan yang suhunya lebih rendah. Perpindahan panas yang terjadi antara permukaan padat dengan fluida yang mengalir disekitarnya. Jadi perpindahan panas ini memerlukan media penghantar berupa fluida (cairan atau gas). Perpindahan panas konveksi terjadi melalui cara, yaitu :

- a) Konveksi bebas / konveksi alamiah (*free convection / natural convection*).

Adalah perpindahan panas yang disebabkan oleh beda suhu dan beda rapat saja dan tidak ada tenaga dari luar yang mendorongnya. Contohnya plat panas dibiarkan berada diudara sekitar tanpa ada sumber gerakan dari luar.

- b) Konveksi paksa (*forced convection*).

Adalah perpindahan panas yang aliran gas atau cairannya disebabkan adanya tenaga dari luar. Contohnya plat panas dihembus udara dengan kipas / *blower* [14].

c. Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan panas yang terjadi karena pancaran / sinaran / radiasi gelombang elektromagnetik. Perpindahan panas radiasi berlangsung elektromagnetik dengan panjang gelombang interval tertentu, jadi perpindahan panas radiasi tidak memerlukan media, sehingga perpindahan panas berlangsung dalam ruangan hampa udara. Contoh : panas yang sampai kebumi.

Benda yang dapat memancarkan panas yang sempurna disebut radiator yang sempurna dan dikenal dengan benda hitam (*black body*), sedangkan benda yang tidak dapat memancarkan panas dengan sempurna disebut dengan benda abu-abu (*gray body*) [15].

2.2.5 Mesin Kalor

Gagasan dasar dibalik mesin kalor adalah bahwa energi mekanik bisa didapat dari energi termal hanya ketika kalor dibiarkan mengalir dari temperatur tinggi ke rendah. Dalam proses ini, sebagian kalor diubah menjadi mekanik, sebagian diubah menjadi kerja W (Joule/ kalori) dan sebagian dibuang sebagai kalor Q_L (Joule/ kalori) pada temperatur lebih rendah T_L ($^{\circ}\text{C}$). Pada keadaan dimana sebuah sistem tertutup menyerap kalor dari sebuah reservoir panas maka sebagian kalor akan berubah menjadi energi mekanik atau energi gerak [11].

Jika siklus proses dapat dilakukan dengan berulang-ulang maka gas akan melakukan kerja terus menerus pada lingkungan. Untuk memanfaatkan kerja yang dilakukan oleh gas tersebut orang lalu merancang mesin yang dikenal sebagai mesin kalor. Dalam mesin ini gas di atur untuk melakukan siklus proses secara terus-menerus. Kerja yang dihasilkan oleh gas digunakan untuk memutar mesin, yang kemudian dapat diubah ke energi bentuk lain seperti energi listrik, menggerakkan roda kendaraan dan lain lain. Contoh mesin kalor adalah mesin kendaraan bermotor, turbin, mesin jet, *stirling engine* dan sebagainya. Mesin kalor kerjanya terjadi karena adanya proses berulang-ulang yang dilakukan oleh gas yang kemudian dapat diubah menjadi energi bentuk lain [12].

2.2.6 Efisiensi

Efisiensi mengukur kemampuan suatu mesin mengubah kalor yang diserap dari reservoir panas menjadi kerja. Untuk Q_1 yang sama, mesin yang menghasilkan kerja lebih besar dikatakan memiliki efisiensi. Suatu mesin panas memiliki kemampuan untuk mengubah kalor yang diserap menjadi usaha atau kerja, untuk mengukur seberapa besar kalor yang diubah menjadi kerja yaitu disebut dengan efisiensi.

Efisiensi dirumuskan dengan :

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \times 100\% \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)

W = Usaha (Joule/ kalori)

Q_1 = Kalor yang diserap (Joule/ kalori)

2.2.7 Mesin Carnot

Pada tahun 1824, seorang insinyur Prancis bernama Sadi Carnot menjelaskan sebuah mesin teoritis, yang sekarang disebut mesin Carnot, yang sangat penting baik dari sudut pandang praktis maupun teoritis. Ia menunjukkan bahwa sebuah mesin kalor yang bekerja pada suatu siklus ideal yang reversibel yang disebut siklus Carnot antara dua reservoir energi merupakan mesin paling efisien yang mungkin ada. Mesin Carnot merupakan suatu mesin siklus ideal yang reversibel dengan efisiensi paling tinggi. Mesin Carnot adalah mesin yang paling sempurna, namun mesin ini tidak dapat dibuat, mesin Carnot

hanyalah mesin yang ada dalam teori. Dalam persamaan kita akan dapatkan bahwa efisiensi mesin Carnot sama dengan 100% jika $T_1 = \infty$ atau $T_2 = 0$. Tetapi suhu nol dan tak berhingga tidak dapat dihasilkan. Jadi, efisiensi mesin Carnot tidak mungkin mencapai seratus persen. Karena mesin Carnot merupakan mesin yang paling efisiensi, maka efisiensi mesin-mesin kalor lainnya berada jauh dibawah 100%. Dalam hal ini mesin Carnot hanyalah sebuah mesin yang tidak mungkin dibuat, mesin kalor lain hanya dapat mendekat efisiensi mesin Carnot.

Efisiensi mesin Carnot adalah:

$$\eta = \left[1 - \frac{T_2}{T_1} \right] \times 100 \% \dots \dots \dots (2.3)$$

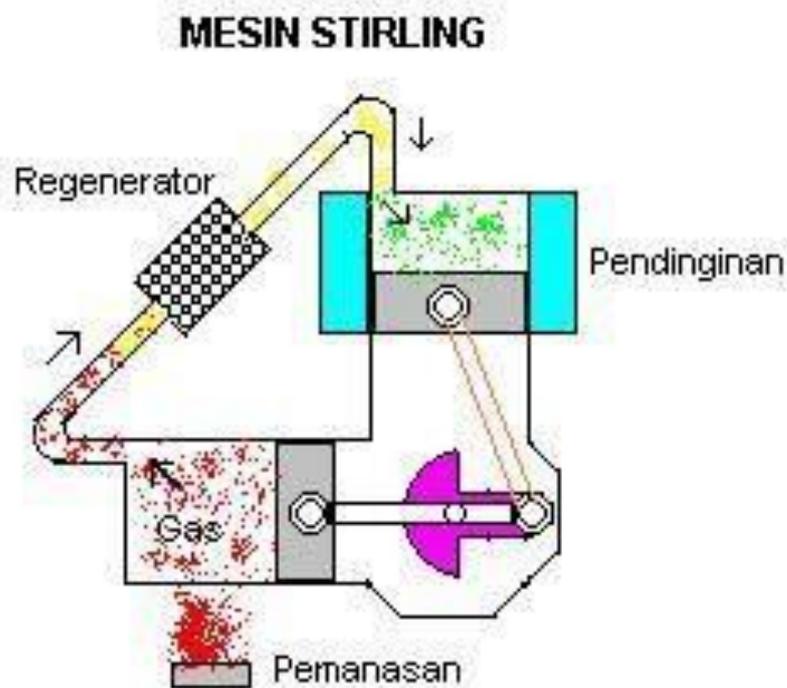
η = Efisiensi mesin carnot (%)

T_1 = Suhu pada reservoir suhu tinggi (Kelvin)

T_2 = Suhu pada reservoir suhu rendah (Kelvin)

2.3. Pengertian *Stirling Engine*

Stirling Engine adalah mesin kalor yang mengambil kalor dari luar silinder kerjanya. Sumber kalor apapun selama temperaturnya cukup tinggi, akan bisa menggerakkan motor ini. Secara prakteknya siklus *Stirling Engine* berbeda dengan siklus teoritik yang di dalamnya terdapat proses dua temperatur konstan dan dua volume konstan [7].



Gambar 2.1. Sistem pembakaran *Stirling Engine*

Stirling Engine merupakan mesin pembakaran *eksternal* yang menggunakan udara atau gas (*helium, hydrogen, nitrogen, methanol, dsb*) sebagai fluida kerjanya, bekerja berdasarkan prinsip peredaran termodinamika (motor udara panas), ditemukan pada tahun 1816 oleh Robert Stirling, Kilmamock-Skotlandia. Jadi pada *Stirling Engine*, gas hanya disusutkan dan kemudian dikembangkan dengan pemanasan dari luar [1].

Sebuah regenerator memungkinkan panas yang dihasilkan disimpan di dalam, sebagian menggantikan energi panas karena sedikitnya alih panas yang dimungkinkan melalui dinding *heat-exchanger*. Energi panas disimpan di dalam regenerator sementara gas penggerak menyusup ke ruangan yang dingin, dan kemudian dilepaskan sewaktu kembali ke ruangan ekspansi panas. Tenaga terjadi pada temperatur yang tinggi dan konstan, sangat ideal untuk setiap mesin.

Kompresi terjadi pada temperatur rendah, dan hampir tidak ada energi panas yang hilang. Tenaga bersih yang dihasilkan adalah akibat perbedaan antara pengembangan gas bertemperatur tinggi dan mengkompresi gas bertemperatur rendah [16].

Mesin ini dapat membakar setiap bahan bakar padat (*solid*) atau cairan sebagai sumber pemanasannya. Hal ini menyebabkan *Stirling Engine* sangat menarik, khususnya pada situasi dimana bahan bakar konvensional saat ini sangat mahal dan sulit untuk memperolehnya. Beberapa jenis *Stirling Engine*, selain demikian efektif juga sangat mudah pembuatannya, sehingga menjadi pilihan yang terbaik untuk sistem pembangkit listrik di beberapa negara berkembang [2].

2.4. Sejarah Pengembangan *Stirling Engine*

Stirling Engine ditemukan tahun 1816 oleh Robert Stirling (1790-1878). Saat itu disebut mesin udara dengan model mesin pembakaran luar siklus tertutup. Dia mematenkan temuan itu pada 27 September 1816 dan berlaku efektif 20 Januari 1817 atau ketika dia baru berumur 26 tahun [17].

Prinsip kerja secara teoretis dikembangkan George Cayley dari Inggris 20 tahun lebih awal. Istilah *Stirling Engine* dipopulerkan kali pertama kali oleh Rolf Meijer untuk menjelaskan semua tipe mesin gas regeneratif siklus tertutup. Perkembangan produksi *Stirling Engine* dibawa J Ericsson, penemu dan insinyur berkewarganegaraan Swedia. Dia berhasil dalam fabrikasi *Stirling Engine* dan menjual hingga 2.000 unit mesin ukuran 0.5-5 hp sekitar tahun 1850 di Inggris dan Amerika [1].

Sejak awalnya *Stirling Engine* memiliki reputasi kerja yang baik dan masa kerja yang lama (di atas 20 tahun), antara lain digunakan sebagai mesin pompa air dengan kapasitas rendah, yaitu pada pertengahan abad ke sembilanbelas sampai sekitar tahun 1920, yaitu ketika mesin pembakaran internal dan motor listrik mulai menggantikannya [6].

Mesin dengan udara panas (*hot-air machine*) dikenal karena cara kerjanya yang mudah, kemampuannya menggunakan berbagai jenis bahan bakar, selain itu operasinya aman, tidak berisik, efisiensinya memadai (*moderate*), stabil dan rendah biaya perawatannya. Kekurangannya adalah ukurannya yang sangat besar namun daya keluarannya (*output*) kecil dan harganya investasinya tinggi / mahal (untuk ukuran saat itu). Lepas dari pada itu, karena biaya operasinya rendah, maka *Stirling Engine* dipilih aplikasinya untuk mesin dengan tenaga uap pilihan satu-satunya pada saat itu yang boros bahan bakar untuk mesin dengan daya yang sama, dan memerlukan perhatian khusus untuk mencegah terjadinya bahaya ledakan atau kerusakan lainnya [16].

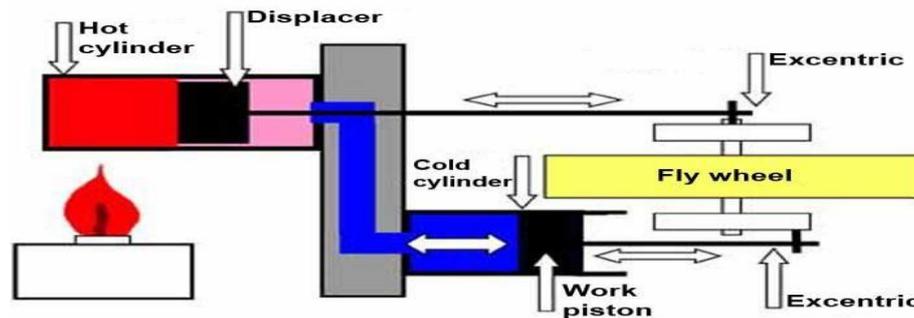
Kekurangan utama lainnya untuk jenis mesin udara panas adalah kecenderungannya gagal operasi apabila *heater head* terlalu panas, walaupun hal itu kemudian dapat diatasi setelah dilakukan rekayasa ulang *heater head* nya, yang dapat mencegah panas lebih, serta aman pada mesin dengan daya rendah. Namun tetap saja penyempurnaan ini tidak mampu meningkatkan daya saing mesin ini terhadap mesin-mesin pembakaran *internal* lainnya yang bermunculan dipasaran pada waktu itu yang harganya jauh lebih murah [13].

Penemuan baru baja tahan karat (*stainless steel*) dan berkembangnya pengetahuan pada proses mesin termodinamik yang kompleks, mengawali temuan

mesin-mesin baru, menjelang dan sesudah perang Dunia ke II. Desain mesin udara panas yang disempurnakan, dengan bobot dan harga yang lebih murah, konstruksi dan operasinya yang mudah, dan yang lebih penting lagi adalah variasi bahan bakarnya yang tetap tidak berubah (bisa dengan udara ataupun gas). Ironisnya, beberapa negara maju justru tidak tertarik menggunakan sistem mesin yang sangat sederhana ini untuk umpamanya pada mesin otomotif yang canggih, sistem pembangkit (daya listrik, dan lain-lain bukan untuk daya dorong primer) pada pesawat ruang angkasa dan lain-lain. Situasi ini kemudian berubah tahun 1980, setelah agen Amerika Serikat (AS) untuk bantuan pengembangan mendanai pengembangan internasional pembuatan *Stirling Engine* untuk negara-negara berkembang, dan itu dimulai dari Bangladesh. Dari sinilah berawal prospek pengembangan dan pemanfaatan *Stirling Engine* untuk negara-negara berkembang lainnya, di Afrika, Asia dan Amerika Latin, sebagai salah satu solusi mesin yang murah dan hemat energi dengan menggunakan udara atau gas (*helium, hydrogen, nitrogen, methanol*, dsb) sebagai fluida kerjanya [2].

2.5. Prinsip Kerja

Prinsip kerja *Stirling Engine* dapat dilihat pada Gambar 2.2. adalah sebuah mesin kalor yang unik karena efisiensi teoretisnya mendekati efisiensi teoretis maksimum, yang lebih dikenal dengan efisiensi mesin carnot. *Stirling Engine* digerakkan ekspansi gas ketika dipanaskan dan diikuti kompresi gas ketika didinginkan. Mesin itu berisi sejumlah gas yang dipindahkan antara sisi dingin dan panas terus-menerus. *Piston displacer* memindahkan gas antara dua sisi dan *piston power* mengubah volume *internal* karena ekspansi dan kontraksi gas [18].



Gambar 2.2.Prinsip kerja *Stirling Engine*

Robert Stirling menyebut *piston* yang berpindah sebagai regenerator. Regenerator itu dapat membangkitkan kembali udara. Jika *piston* bergerak ke atas, regenerator dialirkan melalui udara hangat dan mengambil sebagian energi dari udara dan menyimpannya. Jika *piston* bergerak ke bawah, dialirkan melalui udara dingin dan mengeluarkan energi yang disimpan. Dengan regenerator, *Stirling Engine* mencapai efisiensi sangat baik [1].

Sebuah regenerator memungkinkan panas yang dihasilkan disimpan di dalam, sebagian menggantikan energi panas karena sedikitnya alih panas yang dimungkinkan melalui dinding *heat-exchanger*. Energi panas disimpan di dalam regenerator sementara gas penggerak menyusup ke ruangan yang dingin, dan kemudian dilepaskan sewaktu kembali ke ruangan ekspansi panas. Tenaga terjadi pada temperature yang tinggi dan konstan, sangat ideal untuk setiap mesin. Kompresi terjadi pada temperatur rendah, dan hampir tidak ada energi panas yang hilang. Tenaga bersih yang dihasilkan adalah akibat perbedaan antara pengembangan gas bertemperatur tinggi dan mengkompresi gas bertemperatur rendah [2].

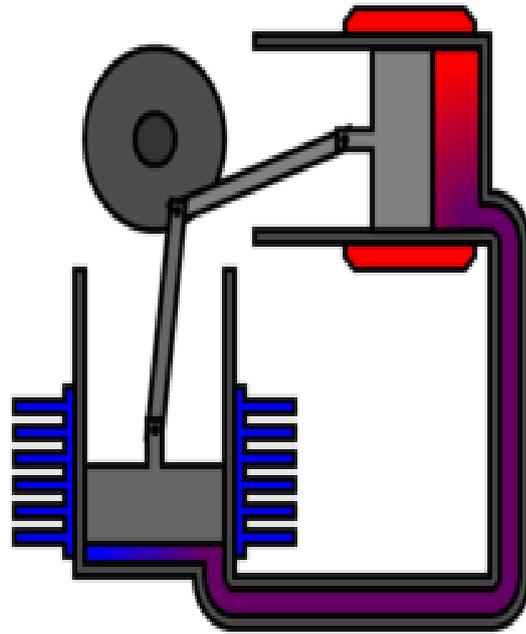
Pada dasarnya sistem pembangkit listrik dengan generator *Stirling Engine* mempunyai beberapa komponen untuk membangkitkan sebuah beban yang akan

menghasilkan tegangan, arus, dan daya. Dalam hal ini pengaruh energi panas menjadi salah satu faktor utama dalam penentuan bentuk dan jenis dari *Stirling Engine* tersebut harus dikondisikan dengan sedemikian rupa hingga diperoleh pembangkit listrik dengan tingkat prestasi yang tinggi dan sesuai dengan karakteristik dan bentuk yang diinginkan. *Stirling Engine* ini dapat membakar setiap bahan padat (*solid*) atau cairan ataupun gas sebagai sumber pemanasannya [7].

2.6. Jenis – jenis *Stirling Engine*

a. Stirling Engine Alfa

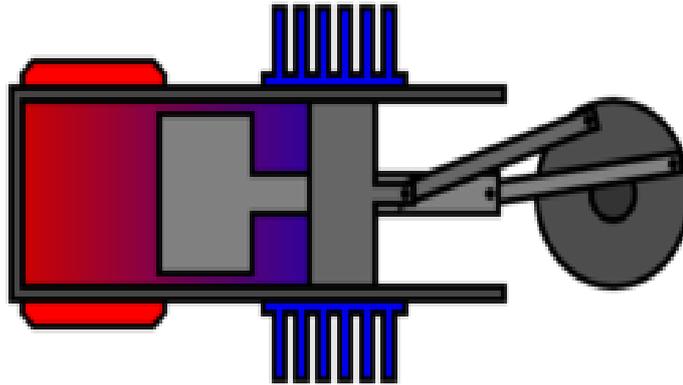
Berisi kekuatan dua *piston* dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam *displacer* suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio power-to-volume 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 mati tambahan [19].



Gambar 2.3. *Stirling Engine* Alfa.

b. Stirling Engine Beta

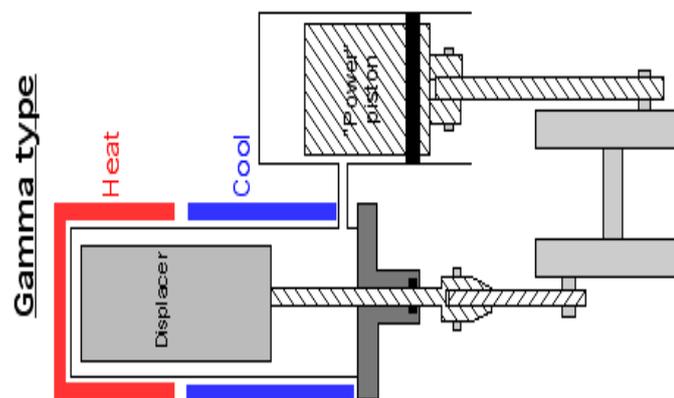
Stirling Engine Beta memiliki *piston* daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai *displacer piston*. Silinder *Piston displacer* yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Ketika silinder dipanaskan gas 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 alfa) menjadi panas [20].



Gambar 2.4. *Stirling Engine* Beta.

c. *Stirling Engine* Gamma

Stirling Engine gamma hanyalah sebuah *Stirling Engine* beta, di mana *piston* tenaga sudah terpasang di dalam silinder yang terpisah samping silinder *piston displacer*, tapi masih terhubung ke roda gila sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena mereka berada dalam satu tubuh. Konfigurasi ini menghasilkan rasio kompresi lebih rendah, tetapi mekanis ini cukup sederhana dan sering digunakan didalam *Stirling Engine* multi-silinder.

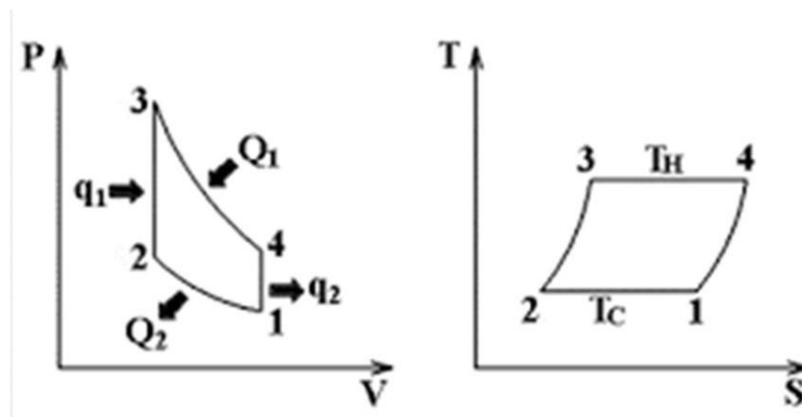


Gambar 2.5. *Stirling Engine* Gamma.

2.7. Siklus *Stirling Engine*

a. Siklus *Stirling* Ideal

Pada gambar berikut memperlihatkan siklus *stirling* ideal. Siklus ini terdiri dari empat proses yang dikombinasikan menjadi siklus tertutup yaitu dua proses isothermal dan dua proses isokhorik. Proses-proses tersebut ditunjukkan pada diagram tekanan volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-s) [6]. Luas area didalam diagram siklus *stirling* tersebut adalah kerja indikator yang dihasilkan dari siklus tersebut. Kerja dihasilkan oleh siklus hanya dihasilkan dari proses isothermal saja. Untuk memfasilitasi kontinuitas kerja dari dan menuju sistem, sebuah roda gila harus diintergrasikan dalam rancangan *Stirling Engine*. Roda gila sebagai *storage device* untuk energi. Dalam siklus ini, panas harus ditransmisikan dalam sebuah prosesnya.



Gambar 2.6. Diagram P-V dan T-S

Kerja yang dihasilkan dari siklus *stirling* tertutup ideal direpresentasikan oleh area 1-2-3-4 pada diagram P-V. Dari hukum termodinamika pertama, kerja output harus sama dengan panas input yang representasikan pada area 1-2-3-4 pada diagram T-S [11].

b. Siklus *Stirling Engine* Sebenarnya

Siklus *Stirling Engine* sebenarnya ditunjukkan pada gambar dibawah. Seperti yang dapat dilihat, kerja selama proses 2-3 dan 4-1, tidak seperti prediksi siklus ideal. Salah satu penyebabnya adalah regenerator pada *Stirling Engine* menambah gesekan pada aliran fluida. Penyebab lain yang menyebabkan inefisiensi dari siklus *stirling* sebenarnya yaitu tidak seluruh fluida kerja berpartisipasi dalam siklusnya, contohnya yaitu fluida kerja yang berada dalam volume sisa. Volume sisa akan selalu ada karena adanya *regenerator*, *clearance*, pipa saluran yang diperlukan untuk meningkatkan pertukaran kalor pada sistem sebenarnya. Meskipun begitu siklus *stirling* tersebut dapat dianalisis menggunakan prinsip-prinsip termodinamika, analisis tersebut sebagai perumpamaan dari *Stirling Engine* sebenarnya.

Dalam proses pembuatan sebuah model *Stirling Engine*, dibutuhkan proses perancangan. Proses perancangan tersebut meliputi proses perhitungan termodinamika yang nantinya dijadikan acuan dalam perancangan elemen mesin, pemilihan bahan dan penentuan dimensi dari model *Stirling Engine* tersebut. Salah satu yang biasa digunakan sebagai pendekatan model termodinamika *Stirling Engine* adalah teori *Schmidt*. Teori Schmidt yang digunakan dalam penelitian ini merupakan teori Schmidt yang dipublikasikan oleh Koichi Hirata, seorang ilmuan asal jepang. Teori Schmidt adalah salah satu metode perhitungan yang paling sederhana dan sangat berguna untuk pengembangan *Stirling Engine*. Teori ini berdasarkan pada ekspansi isothermal dan kompresi gas ideal [21].

Stirling Engine bekerja dengan urutan:

- a. Ruang udara dipanasi dari bawah, maka udara di dalamnya akan memuai dan menekan *power piston* ke atas.
- b. *Power piston* menggerakkan *crank shaft* bersamaan dengan itu *displacer* akan berpindah tempat ke posisi paling atas, dengan adanya posisi *displacer* di bagian atas ruang udara, maka mayoritas udara di dalam ruang udara mengalami pemanasan. Sehingga terjadi kompresi lanjutan yang menyebabkan *power piston* terus bergerak hingga posisi puncak.
- c. Saat *power piston* berada di posisi puncak maka dengan bantuan *fly wheel*, segera piston akan bergerak turun lagi, posisi *displacer* sudah berada di tengah, sehingga dengan demikian sebagian udara akan mengalami penyusutan yang mengakibatkan *power piston* terhisap ke bawah.
- d. Hal ini terus berlangsung hingga posisi *power piston* terendah di ikuti oleh pergerakan *displacer* ke tengah.
- e. Dan begitu seterusnya, hal ini berlangsung juga dengan bantuan *fly wheel* yang menyimpan momen inersianya [7].

2.8. Suhu (Temperatur)

Suhu menunjukkan energi yang dimiliki oleh suatu benda. Setiap atom dalam suatu benda masing-masing bergerak, baik itu dalam bentuk perpindahan maupun gerakan ditempat getaran. Makin tingginya energi atom-atom penyusun benda, makin tinggi suhu benda tersebut. Suhu dapat diukur dengan alat thermometer, empat macam thermometer yang paling dikenal adalah Celsius, *Reaumur*, *Fahrenheit* dan *Kelvin* [22].

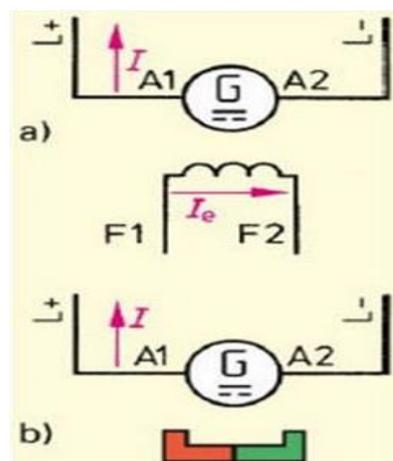
2.9. Generator *Direct Current* (DC)

Generator DC adalah generator yang menghasilkan arus searah. Pada generator DC arah arus induksinya tidak berubah, hal ini disebabkan cincin yang digunakan pada generator DC berupa cincin belah (komutator). Komutator menyebabkan terjadinya komutasi, peristiwa komutasi merubah arus yang dihasilkan generator menjadi searah.

Generator DC terdiri dua bagian, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian mesin DC yang diam dan rotor 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.

Generator DC berdasarkan dari rangkaian belitan magnet atau penguat eksitasinya terhadap jangkar (angker), yaitu generator penguat terpisah, belitan eksitasi (penguat eksitasi) tidak terhubung menjadi satu dengan rotor. Terdapat dua jenis generator penguat terpisah, yaitu :

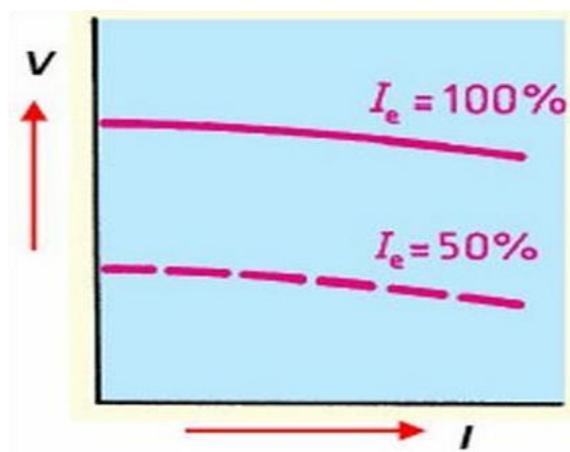
1. Penguat elektromagnetik.
2. Magnet permanent / magnet tetap.



Gambar 2.7. Generator Penguat Terpisah

Energi listrik yang dihasilkan oleh penguat electromagnet dapat diatur melalui pengaturan tegangan eksitasi. Pengaturan dapat dilakukan secara elektronik atau magnetik. Generator ini bekerja dengan catu daya DC dari luar yang dimasukkan melalui belitan F1-F2. Penguat dengan magnet permanen menghasilkan tegangan output generator yang konstan dari terminal rotor A1-A2. Karakteristik tegangan V relatif konstan dan tegangan akan menurun sedikit ketika arus beban I dinaikkan mendekati harga nominalnya. Adapun karakteristik generator penguat terpisah yaitu :

- Karakteristik generator penguat terpisah saat eksitasi penuh (I_e 100%) dan saat eksitasi setengah penuh (I_e 50%). I_e adalah arus eksitasi, I adalah arus beban. Tegangan output generator akan sedikit turun jika arus beban semakin besar.
- Kerugian tegangan akibat reaksi jangkar.
- Perurunan tegangan akibat resistansi jangkar dan reaksi jangkar.
- Selanjutnya, mengakibatkan turunnya pasokan arus penguat ke medan magnet, sehingga tegangan induksi menjadi kecil.



Gambar 2.8.Karakteristik Generator Penguat Terpisah

1.10. Faktor Daya

Faktor daya merupakan salah satu indikator baik buruknya kualitas daya listrik. Menurut R. S. Hartati Faktor daya atau faktor kerja adalah perbandingan antara daya aktif (W) dengan daya semu/daya total (VA) atau cosinus sudut antara daya aktif dan daya semu/daya total [24].

Peningkatan daya reaktif akan meningkatkan sudut antara daya aktif dan daya semu sehingga dengan daya aktif yang tetap akan mengakibatkan peningkatan daya semu yang akan dikirimkan. Dengan kata lain akan menurunkan efisiensi dari sistem distribusi ketenagalistrikan. Factor daya juga disimbolkan sebagai $\text{Cos } \Phi$.

Nilai faktor daya tertinggi adalah 1. Sistem dengan faktor daya seperti ini memiliki efisiensi yang sangat baik dimana hal ini berarti daya total/semu (VA) yang di bangkitkan digunakan secara utuh pada beban resistif (W).

Daya aktif adalah daya yang benar benar digunakan dan terukur pada beban. Daya aktif dibedakan berdasarkan penggunaannya, yaitu pada satu fasa atau tiga fasa. Secara sistematis dapat ditulis :

$$\text{Untuk 1 fasa : } P = V \cdot I \cdot \text{Cos } \phi \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } P = V \cdot I \cdot \text{Cos } \phi \cdot \sqrt{3}$$

Keterangan :

P = Daya aktif (W)

V = Tegangan (V)

I = Arus (A)

$\text{Cos } \phi$ = Faktor Daya

Daya semu adalah nilai tenaga listrik yang melalui suatu penghantar. Daya semu merupakan hasil perkalian dari tegangan dan arus yang melalui penghantar. Daya semu dibedakan berdasarkan penggunaannya, yaitu pada satu fasa dan tiga fasa. Secara matematis dapat dituliskan :

$$\text{Untuk 1 fasa : } S = V \cdot I \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } S = V \cdot I \cdot \sqrt{3}$$

Keterangan :

$$S = \text{Daya Semu (VA)}$$

$$V = \text{Tegangan (V)}$$

$$I = \text{Arus (A)}$$

Daya reaktif adalah hasil perkalian dari tegangan dan arus dengan vektor daya. Secara matematis dapat dituliskan :

$$\text{Untuk 1 fasa : } Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

$$\text{Untuk 3 fasa : } Q = V \cdot I \cdot \sin \phi \cdot \sqrt{3}$$

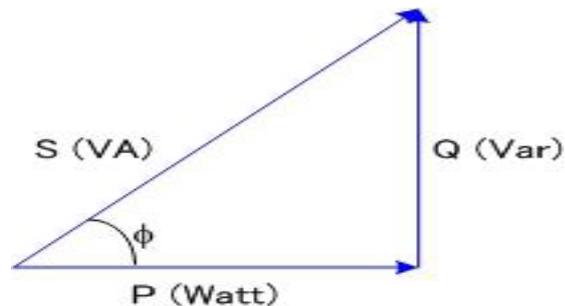
Keterangan :

$$Q = \text{Daya Reaktif (VAR)}$$

$$V = \text{Tegangan (V)}$$

$$I = \text{Arus (A)}$$

$$\sin \phi = \text{Besaran Vektor Daya}$$



Gambar 2.9 Segitiga Daya

Segitiga daya dalam gambar 2.9 diperoleh dari segitiga impedansi yaitu dengan mengalikan masing-masing sisinya dengan arus kuadrat. Proyeksi horizontal dari daya voltampere (VA) adalah daya nyata (W), sedangkan proyeksi vertikalnya adalah daya voltampere reaktif (VAR). Peralatan-peralatan suplai listrik seperti alternator dan transformator, rating dayanya tidak dinyatakan dalam satuan ϕ kilo watt karena beban-beban yang dilayaninya memiliki faktor daya bermacam-macam.

1.11. Metanol

Methanol atau spiritus adalah cairan bening dengan rumus kimia CH_3OH yang kadang-kadang disebut “alcohol kayu”. Methanol adalah cairan bening dengan sifat polar, menjadikannya sebagai pelarut yang baik. Methanol juga sangat mudah terbakar, dan sangat beracun bagi manusia jika tertelan. Secara historis, methanol diciptakan ketika selulosa, gula utama dalam kayu dan beberapa tanaman lainnya, difermentasi oleh bakteri. Proses fermentasi ini menyebabkan zat yang mematikan untuk dikonsumsi, tetapi berguna sebagai pelarut untuk tujuan ilmiah dan industri.

Methanol digunakan secara industri sebagai bahan anti beku, berbagai pelarut kimia, bahan bakar tertentu, pembuatan banyak plastik, dan dalam campuran alcohol yang ditujukan untuk penggunaan medis atau industri dan bukan dikonsumsi.

Adapun kegunaan methanol antara lain :

1. Sebagai bahan untuk formaldehida. Bahan kimia ini dapat berasal dari methanol yang digunakan secara luas dalam produksi plastik, termasuk yang digunakan dalam bahan konstruksi, bagian mobil, cat, bahan peledak,

dan kain buatan yang tahan kerut, juga sebagai bahan untuk mengawetkan mayat dalam spesimen laboratorium.

2. Sebagai bahan pelarut dari asam asetat, dimetil eter, dan propilena yang digunakan dalam anti-beku. Metanol sendiri juga bias menjadi anti-beku.
3. Bahan bakar karena sifat dan kegunaannya yang sangat mudah terbakar juga sebagai campuran bahan bakar lain untuk membantu dalam pembakaran bahan bakar lain tersebut.

1.12. Inverter

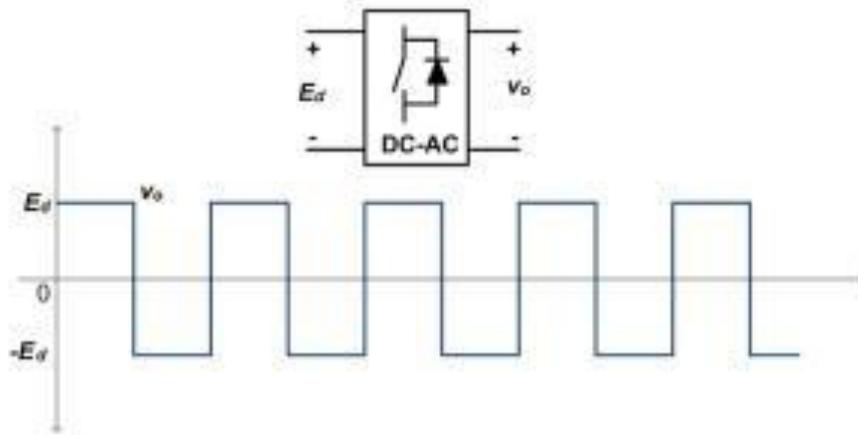
a. Pengertian inverter

Secara sederhana inverter adalah sebuah perangkat atau rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversikan arus tegangan searah (DC) menjadi arus tegangan bolak balik (AC) sehingga cara kerja inverter adalah kebalikan dari power supply converter seperti charger handphone dan sebagainya yang termasuk ke dalam jenis adaptor.

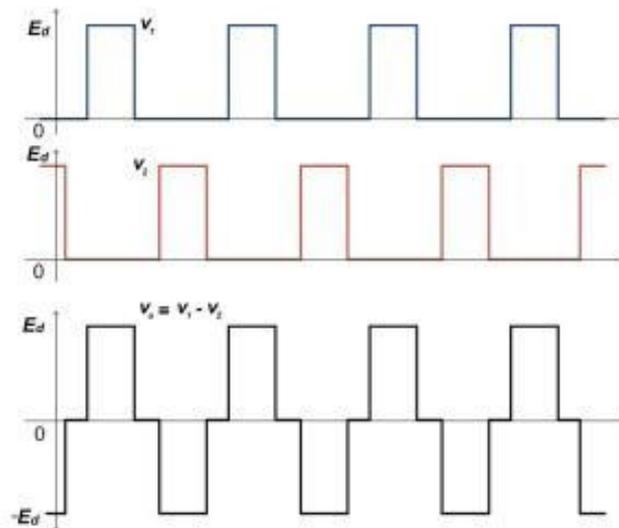
Secara definisi, rangkaian inverter ideal adalah inverter yang tidak menghasilkan riak di sisi masukannya dan menghasilkan sinyal sinusoidal murni di sisi keluarannya, baik yang terkontrol arus/tegangan, terkontrol frekuensi, ataupun terkontrol kedua-duanya. Secara umum rangkaian inverter biasanya digunakan dalam aplikasi pengendali kecepatan motor AC, variable-frequency drives, UPS/catu-daya AC, pemanas induksi/microwave dan lainnya

Cara paling sederhana untuk menghasilkan tegangan AC adalah dengan cara mengatur keterlambatan sudut penyalaan saklar pada tiap lengan inverter sehingga mampu menghasilkan level tegangan keluaran positif dan negative yang berulang dengan frekuensi tertentu, seperti hanya yang ditunjukkan gambar 2.10,

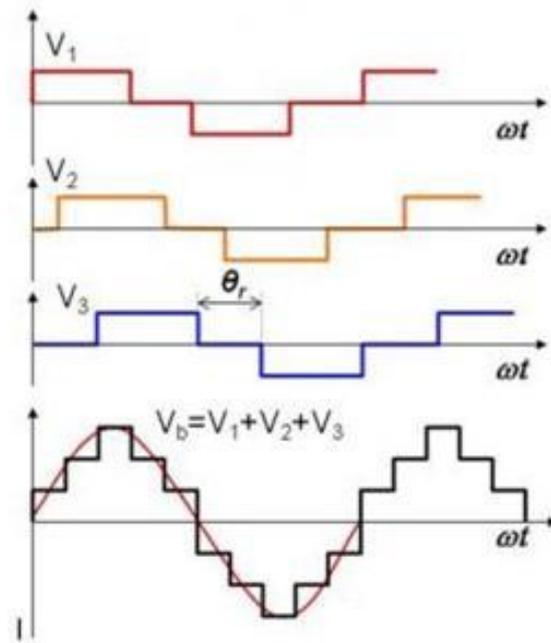
2.11, dan 2.12 secara berurutan. Dari gambar terlihat bahwa dengan menambah jumlah level tegangan keluaran, bentuk gelombang kotak dapat diubah mendekati tegangan sinusoidal. Jumlah level tegangan keluaran ini dapat diperoleh dengan teknik penyaklaran dan topologi inverter kapasitor-split, diode-clamped ataupun inverter yang disusun secara kaskade



Gambar 2.10 Tegangan AC Kotak 2-level (tegangan keluaran inverter center tap setengah jembatan)

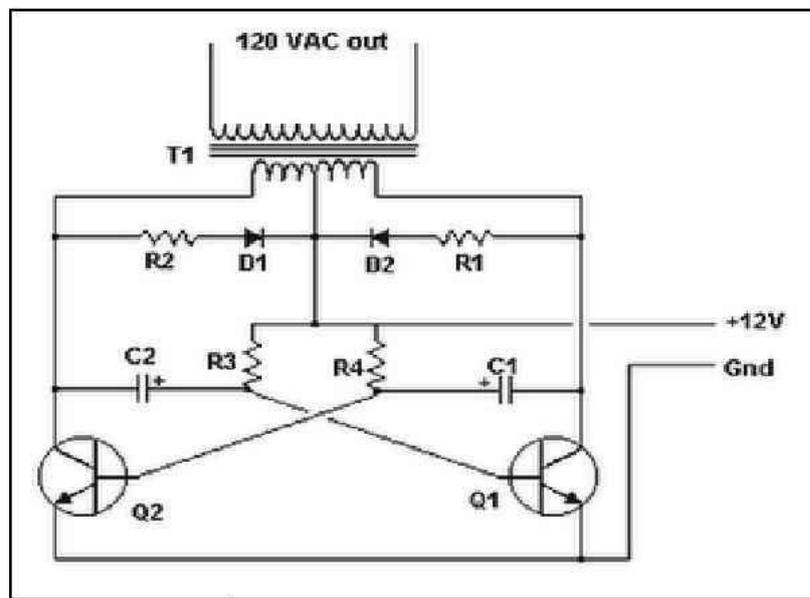


Gambar 2.10 Tegangan AC kotak 3-level



Gambar 2.11 Tegangan AC kotak 6-level

b. Prinsip Kerja Inverter



Gambar 2.12. Contoh gambar rangkaian inverter

Pada rangkaian inverter DC ke AC, tegangan mengalir melalui R_1 dan R_2 yang nantinya menuju kapasitor, masing-masing kapasitor yaitu C_1 dan C_2 mulai

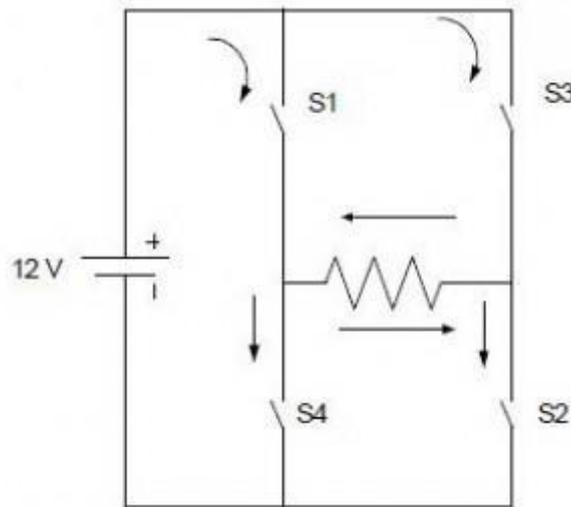
dalam pengisian muatan-muatan listrik, dalam pengisian muatan-muatan listrik ini bergantung pada besarnya arus yang mengalir melalui R_1 dan R_2 sebesar 12 VDC, sedangkan Q_1 dan Q_2 dihubungkan dengan ground. Misalnya dipilih C_2 lebih dulu mengisi muatan-muatan listrik, dan lebih dulu untuk melepaskan muatan-muatan listriknya untuk mengalir menuju basis transistor Q_1 yang kemudian menyulutnya sehingga transistor Q_1 menjadi aktif dan menghantarkan arus dari kolektor ke emitornya.

Selama proses tersebut berlangsung, kapasitor C_1 masih dalam pengisian muatan-muatan listrik, sampai saat transistor Q_1 mulai dalam kondisi penjumlahan dan menuju cut off. Ketika kapasitor C_1 sudah penuh terisi muatan-muatan listrik dan transistor Q_1 masuk ke kondisi cut off, kapasitor C_1 mulai melepaskan muatan-muatan listriknya menuju basis transistor Q_2 . Tegangan yang ada pada basis Q_2 menyulut basisnya dan mengakibatkan transistor Q_2 menjadi aktif untuk menghantarkan kolektor menuju emitornya. Bersamaan dengan peristiwa tersebut, Q_2 sedang dalam pengisian muatan-muatan listrik, dan arus yang mengalir melewati R_1 lewat menuju R_2 untuk menyulut basis dari transistor Q_2 dan mengaktifkannya untuk menghantarkan tegangan.

Kemudian tegangan yang mengalir dari C_1 & C_2 masuk melalui diode dan R_1 & R_2 . Setelah itu tegangan searah (DC) diubah menjadi tegangan bolak balik (AC). T_1 berfungsi sebagai penguat arus maupun tegangan. Paling berpengaruh dalam penguatan suatu tegangan terletak pada jenis transistor yang di pakai.

Prinsip kerja inverter dapat dijelaskan dengan menggunakan 4 saklar seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.13. Bila saklar S_1 dan S_2 dalam kondisi tertutup, maka akan mengalir arus DC ke beban R dari arah kiri ke kanan. Jika yang

tertutup adalah saklar S_3 dan S_4 maka akan mengalir aliran arus DC ke beban R dari arah kanan ke kiri. Inverter biasanya menggunakan modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation*-PWM) dalam proses konversi tegangan DC menjadi tegangan AC



Gambar 2.13. Prinsip kerja inverter.

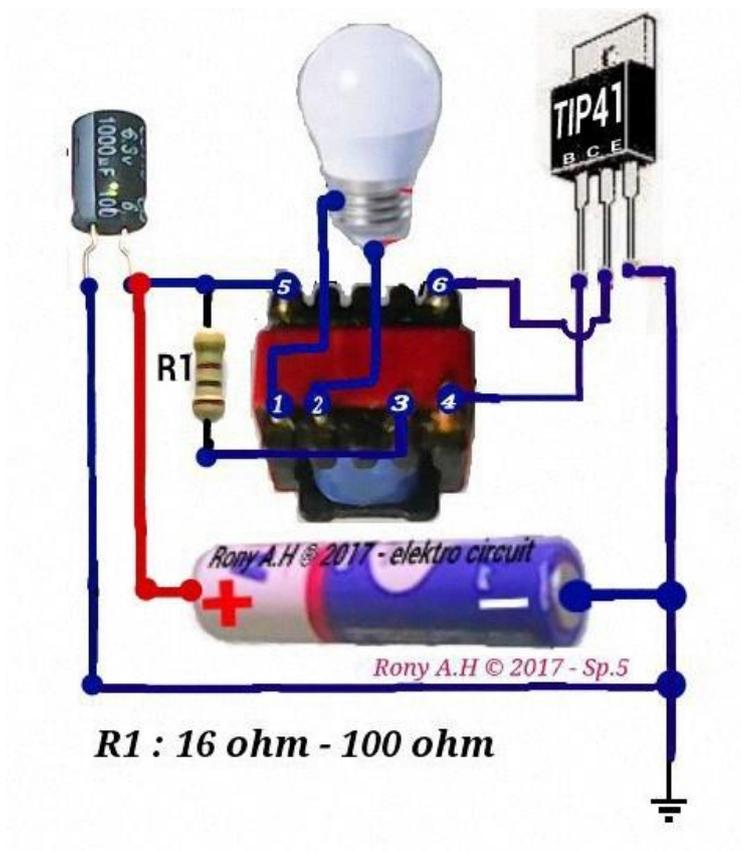
1.13. Joule Thief Inverter

Sirkuit Joule thief dikenal sebagai rangkaian transistor pemblokiran sederhana yang bekerja sebagai pencuri energi yang bisa menghasilkan energi listrik besar dengan sumber energi sangat kecil. Rangkaian Joule-thief memiliki efisiensi tinggi, akselerasi handal dan respon dinamis yang sangat cepat.

Joule thief adalah rangkaian penaik tegangan (*voltage booster*) yang mampu beresilasi sendiri dengan komponen yang kecil, murah dan mudah dibuat, yang biasanya digunakan untuk menggerakkan beban yang ringan. Joule thief dapat menggunakan hampir seluruh energi dalam sebuah baterai sel-tunggal, bahkan yang memiliki tegangan jauh di bawah tegangan nominal sebuah baterai.

Dinamakan joule thief, karena rangkaian ini “mencuri” energi (joule) dari sumber tegangan.

Rangkaian joule thief mengadopsi sistem discharge kapasitor elektrolit yang dipadukan dengan kapasitor nonpolar sebagai filter arus DC pada lilitan sekunder yang di seri dengan lilitan feedback. Hal ini akan menekan frekuensi kerja trafo ferrite transformator yang cenderung tinggi, sehingga arus output bisa lebih besar



Gambar 2.14 rangkaian joule thief sederhana

Komponen yang digunakan joule thief inverter pada gambar 2.9 diatas antara lain:

1. R1 = 16 ohm – 100 ohm
2. C = 1000µF
3. Transistor NPN jenis TIP41

4. E ferrite mini transformator bekas charger handphone
5. Sumber tegangan = baterai 1,5 VDC
6. Lampu LED 3 watt

Dengan cara kerja :

R basis memberi pengaturan terhadap besar arus feedback yang memicu basis transitor. Ini mempengaruhi power out dan kestabilan frekuensi kerja dari transistor sebagai switch yang dapat mengubah tegangan DC menjadi AC. Frekuensi yang stabil akan membuat transistor tidak mengalami overhear. Resistor yang diseri dengan kapasitor dan dipasang secara paralel dengan kumparan primer trafo berfungsi sebagai penstabil lonjakan arus balik dari induksi trafo. Resistor ini juga bisa disebut juga sebagai *snubber* yang juga bisa memberi protect pada transistor agar tidak overheat, juga bisa meredam frekuensi liar yang menyebabkan berdengingnya trafo yang overheat. Setelah tegangan dinaikkan oleh trafo kemudian keluarannya dapat digunakan pada lampu LED 3 watt [26].

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Desember 2018 – Agustus 2019. Tempat penelitian dilakukan di Laboratorium Dasar Sistem Kontrol/Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, kampus utama jalan kapten mukhtar basri no.3 Medan.

3.2. Bahan dan Peralatan Penelitian

Adapun bahan dan peralatan penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut :

3.2.1. Bahan Penelitian

1. Tabung *displacer* dengan diameter 10,5 cm dan tinggi 9,5 cm yang terbuat dari bahan *stainless* 1 pcs, sebagai tabung media ruang aliran fluida kerja..
2. Tabung kaca *displacer* 1 pcs, sebagai media pemanas dan pengatur aliran fluida kerja.
3. *Heat exchanger* 1 pcs, sebagai penyeimbang tabung *displacer* dengan *piston displacer*.
4. Poros Penyangga 4 set, Sebagai penahan tabung *displacer*, *piston Displacer*, *Flywheel*, dan *pully* agar tetap kokoh.
5. *Connecting road piston power* dengan panjang 8 cm 2 pcs, sebagai media penyambung antara tabung *displacer* dengan *Flywheel*, dan *piston Displacer pully*.

6. *Pin road* dengan panjang 2 cm 2 pcs, sebagai penahan *Connecting road piston power* agar tidak lepas.
7. *Fly wheel* dengan diameter 28 mm yang terbuat dari bahan aluminium 1 pcs, Sebagai *piston power* yang menghasilkan putaran.
8. *Pully* 2 pcs, sebagai alat bantu untuk memutar rotor generator elektik DC tipe MM5B60T24-BC.
9. Tali *pully* 1 pcs, sebagai alat bantu memutar *pully*.
10. Dudukan *engine*, Sebagai media wadah *stirling engine*.
11. Baut (+) 4 pcs dan baut L 5 pcs, sebagai memperkuat atau mengencangkan bahan-bahan.
12. Bantalan dudukan *stirling engine* 4 pcs, sebagai penahan atau pemisah *stirling engine* dari wadah pembakaran.
13. Generator elektrik DC tipe MM5B60T24-BC 1 pcs, sebagai energi gerak menjadi energi listrik DC.
14. Tabung kaca mini, sebagai wadah bahan bakar methanol.
15. Ring, sebagai dudukkan tabung kaca mini.
16. Sumbu, sebagai penyerap methanol.
17. Metanol, untuk memicu awal pembakaran dari hot *stirling engine*.
18. Lampu BESTRAM LED 3 watt, sebagai beban listrik bolak balik.
19. Resistor 100 ohm.
20. Kapasitor 1000uF
21. Transistor npn Tip 41.
22. E ferrite mini transformator bekas charger handphone.
23. Kotak besi, sebagai cover rangkaian joule thief yang dirancang.

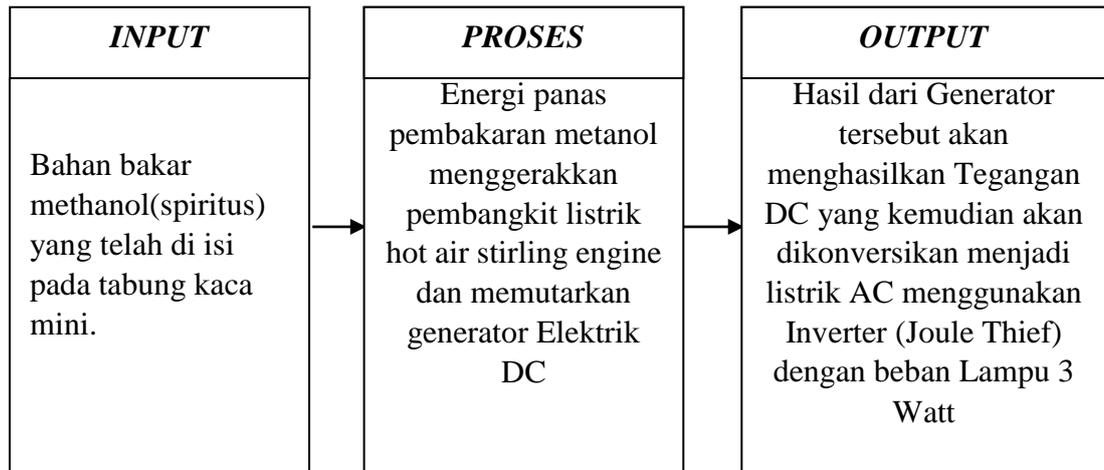
24. Kabel secukupnya, untuk menghubungkan rangkaian joule thief inverter.
25. Saklar, untuk menghidupkan dan mematikan lampu BESTRAM LED 3watt.
26. Fitting lampu, sebagai penadah lampu agar terlihat lebih rapi.

3.2.2. Peralatan Penelitian

1. Obeng (positif & negative), untuk memperkuat atau mengencangkan baut pada poros penyangga.
2. Kunci L, untuk memperkuat atau mengencangkan baut pada *stirling engine*.
3. Mancis, untuk pemicu pembakaran pemula pada bahan bakar metanol.
4. Stopwatch, untuk menghitung berapa lama waktu *Fly wheel* bergerak.
5. Tachometer, untuk mengetahui dan mengukur berapa rpm *Fly wheel* berputar.
6. Termometer digital, untuk mengetahui dan mengukur berapa derajat untuk memutar *Fly wheel*.
7. Multimeter digital, untuk mengetahui dan mengukur nilai arus dan tegangan
8. Solder, untuk melekatkan timah pada rangkaian

3.3 Metodologi Penelitian

Pada bab ini akan dibahas mengenai pembangkit listrik *hot air stirling engine* dengan bahan bakar methanol menggunakan beban listrik bolak balik. Penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan dengan lebih baik melalui blok diagram seperti yang terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Blok Diagram Penelitian

Blok diagram diatas merupakan proses penelitian yang dilakukan setelah diimplementasikan. Berikut adalah keterangan dari setiap blok diagram pada gambar 3.1.

1. Input

Pada blok input, pembakaran bahan bakar methanol sampai mencapai pada panas yang dibutuhkan.

2. Proses

Proses yang dilakukan adalah memanfaatkan energi panas bahan bakar metanol yang dibakar menjadi energi gerak, kemudian diubah menjadi energi listrik DC.

3. Output

Berdasarkan proses yang dilakukan, output akan menghasilkan tegangan DC yang akan dikonversikan menjadi tegangan AC dengan beban lampu 3 watt yang akan digunakan dalam analisa penelitian hot air stirling engine.

3.4. Variabel Data

Data-data yang dibutuhkan adalah :

1. Data analisa karakteristik *hot air stirling engine*.
2. Data perbandingan factor kerja dari pembangkit hot air stirling engine berbeban dan tidak berbeban.
3. Data analisa arus dan tegangan yang dihasilkan generator.

3.5. Jalannya Penelitian

Penelitian dilakukan melalui tahapan sebagai berikut :

1. Menganalisa data-data penelitian terkait dengan data yang didapat dengan proses dari media sosial, internet, jurnal-jurnal, dan konsultasi terhadap ketua jurusan program studi teknik elektro Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
2. Melakukan uji coba pengukuran pembakaran dari bahan bakar spiritus
3. Mengumpulkan data yang diambil dari hasil penelitian maupun dari media sosial, internet, jurnal-jurnal, dan konsultasi dari para dosen-dosen dengan cara wawancara.

3.6. Langkah kerja Penelitian

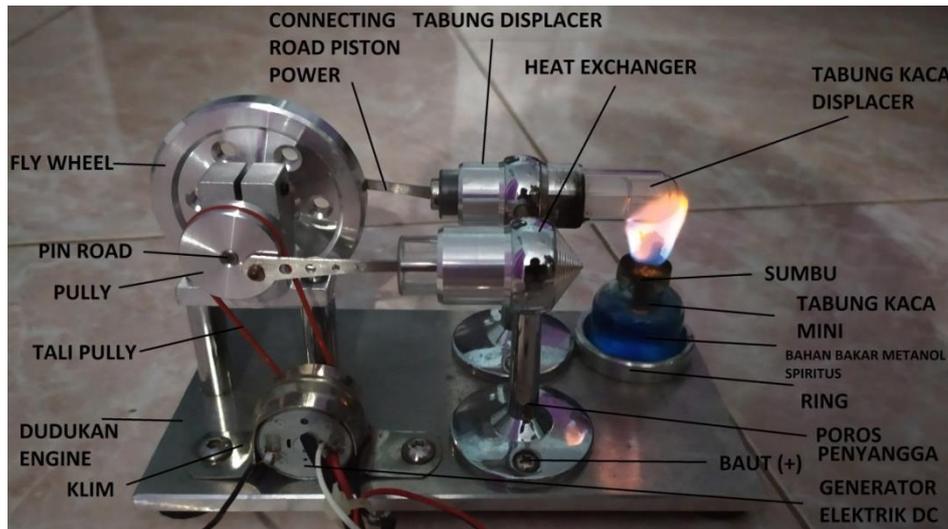
Ada beberapa langkah kerja yang akan dilakukan guna memperoleh sebuah data yang sesuai dengan yang diinginkan penulis. Beberapa langkah tersebut diantaranya adalah :

1. Menyiapkan seluruh bahan-bahan dan peralatan penelitian.
2. Merakit *joule thief inverter* yang sesuai dengan karakteristik *pembangkit listrik hot air stirling* dan menyesuaikan dengan beban listrik bolak balik.

3. Membersihkan alat penelitian dari kotoran-kotoran yang melekat agar bekerja lebih maksimal.
4. Setelah bersih, kemudian memasukkan bahan bakar methanol ke dalam tabung kaca mini.
5. Membakar sumbu tabung kaca mini dibawah tabung kaca *displacer*.
6. Menunggu hingga tabung kaca *displacer* panas dan sekaligus menghidupkan *stopwatch* agar dapat menghitung berapa lama pembakit listrik *hot air stirling engine* bekerja.
7. Membantu *fly wheel* gerak mula dengan cara memutarakan *fly wheel* dengan jari tangan searah jarum jam hingga pembakit listrik *hot air stirling engine* bekerja yang diinginkan.
8. Jika pembakit listrik *hot air stirling engine* bekerja sudah sesuai yang diinginkan, kemudian mengukur temperature (T), kecepatan putaran *fly wheel* (RPM), waktu (s), arus (I), dan tegangan (V) yang dihasilkan.
9. Jika sudah berhasil, mematikan sisa api ditabung pembakaran dan di sumbu tabung kaca mini.
10. Merapikan bahan-bahan dan peralatan percobaan penelitian.
11. Memasukkan hasil-hasil percobaan penelitian kedalam penulisan.

3.7. Gambar Peralatan Penelitian

Pada penelitian ini dipakai beberapa peralatan untuk dapat menjalankan penelitian sesuai dengan prosedur penelitian. Adapun gambar peralatan penelitian antara lain:



Gambar 3.2 Pembangkit Listrik *Hot Air Stirling Engine* Yang Sudah Menggunakan Bahan Bakar Methanol



Gambar 3.3 Multimeter Digital Sebagai Alat Ukur Arus dan Tegangan yang Dihasilkan



Gambar 3.4 Tachometer Digital Sebagai Alat Ukur Kecepatan Putaran *Fly Wheel*



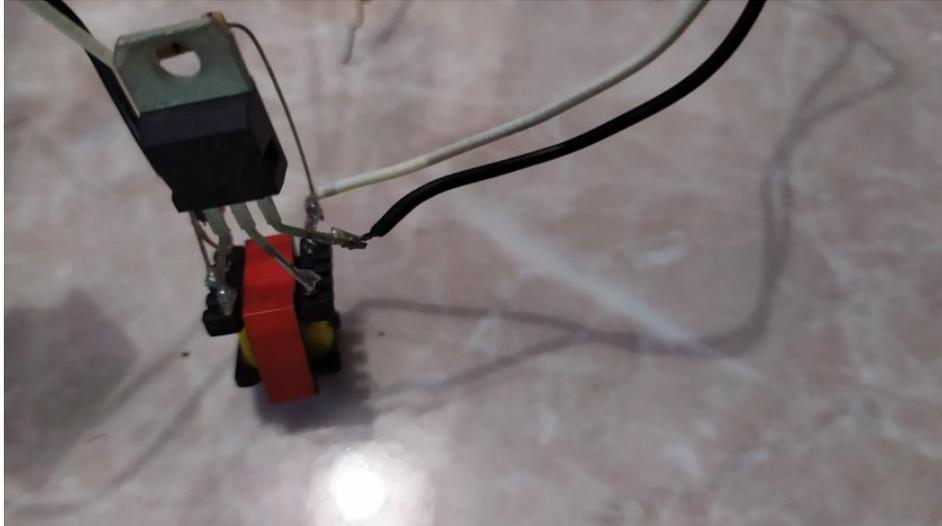
Gambar 3.5 Termometer Digital Sebagai Alat Ukur *Temperature Hot / Th*



Gambar 3.6 Lampu Merk Bestram 3 Wat Sebagai beban AC pada penelitian



Gambar 3.7 Kotak Pelindung Joule Thief Mini Inverter untuk Melindungi dan Mempeindah tampilan dari Joule Thief Inverter

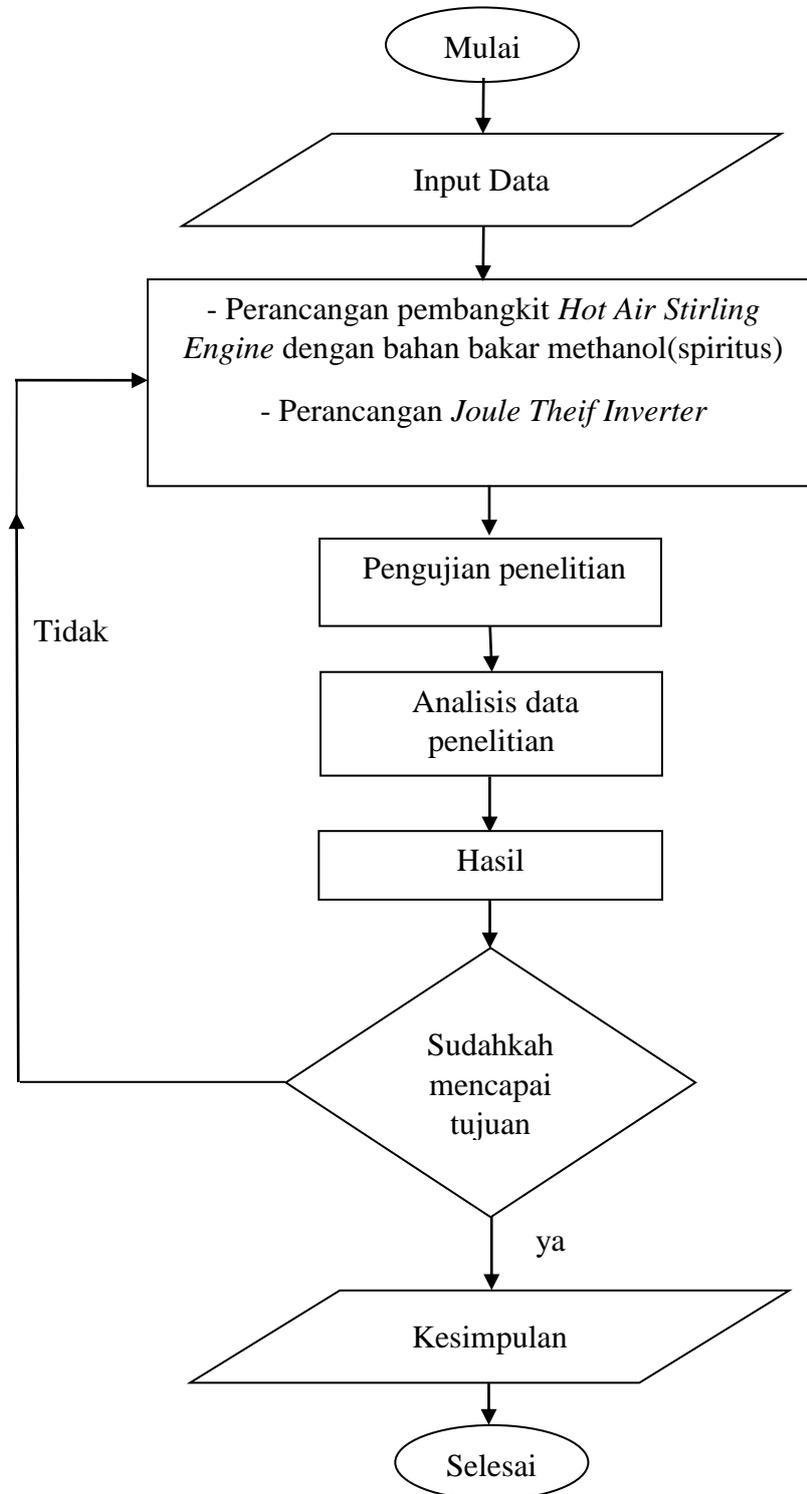


Gambar 3.8 Joule Thief Inverter sebagai penguat dan pengubah tegangan dari DC ke AC



Gambar 3.9 Metanol sebagai bahan bakar penggerak motor stirling

3.8. Flowcart / Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.10 Flowcart / Diagram Alir Penelitian

BAB IV

ANALISA DAN HASIL PENELITIAN

4.1. Analisis Karakteristik Hot Air Stirling Engine

Pengujian bertujuan untuk menganalisa tegangan *output* dari pembangkit listrik *hot air stirling engine* dengan bahan bakar metanol. Untuk melihat hasil dari pengujian, maka dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 4.1. Hasil *Output* Pengujian Tanpa Beban Lampu 3 Watt

NO	Waktu (s)	Temperatur piston dingin (°C)	Temperatur piston panas (°C)	Kecepatan putaran (rpm)	Tegangan (V)	Arus (I)
1.	0	32	66	0	0	0
2.	5	32	75	532	4.8	0.5 A
3.	10	39	78	546	4.8	0.4 A
4.	15	44	82	655	4.9	0.4 A
5.	20	52	91	689	5.0	0.5 A

Hasil pengukuran keluaran arus dan tegangan tanpa beban lampu 3 watt pada pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihasilkan berbeda-beda. Tegangan pada waktu 5 detik dengan suhu piston dingin 32°C dan suhu piston panas 75°C dan kecepatan putaran roda stirling 532 rpm adalah 4.8 V dan arus 0.5 A. Tegangan pada waktu 10 detik dengan suhu piston dingin 39°C dan suhu piston panas 78°C dan kecepatan putaran roda stirling 546 rpm adalah 4.8 V dan arus 0.4 A. Tegangan pada waktu 15 detik dengan suhu piston dingin 44°C dan suhu piston panas 82°C dan kecepatan putaran roda stirling 655 rpm adalah 4.9 V dan arus 0.4 A. Tegangan pada waktu 20 detik dengan suhu piston dingin 52°C dan suhu piston

panas 91°C dan kecepatan putaran roda stirling 689 rpm adalah 5.0 V dan arus 0.5

A.

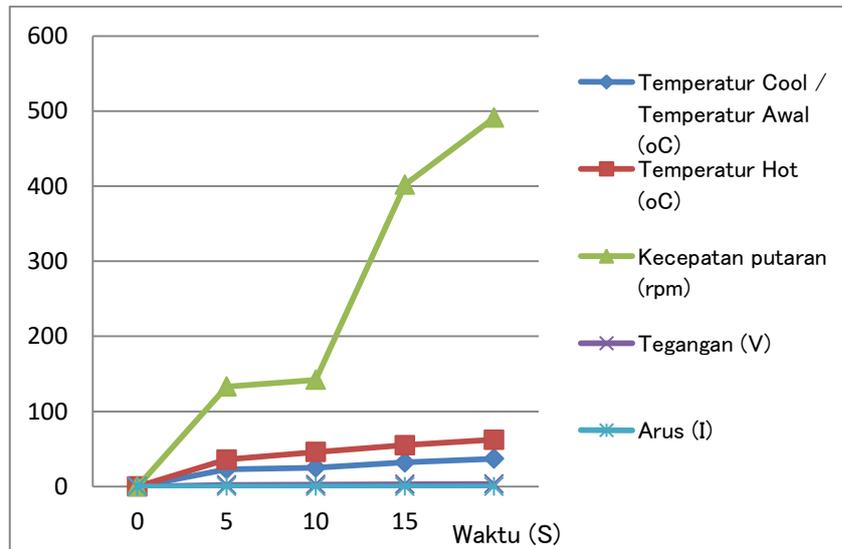
Tabel 4.2. Hasil *Output* Pengujian Dengan Beban Lampu 3 Watt

NO	Waktu (s)	Temperatur dingin (°C)	Temperatur panas (°C)	Kecepatan putaran (rpm)	Tegangan (V)	Arus (I)
1.	0	32	66	0	0	0
2.	5	32	79	343	5.1	1.5 A
3.	10	42	81	382	5.2	1.4 A
4.	15	46	89	388	5.8	1.5 A
5.	20	55	92	391	6.0	1.4 A

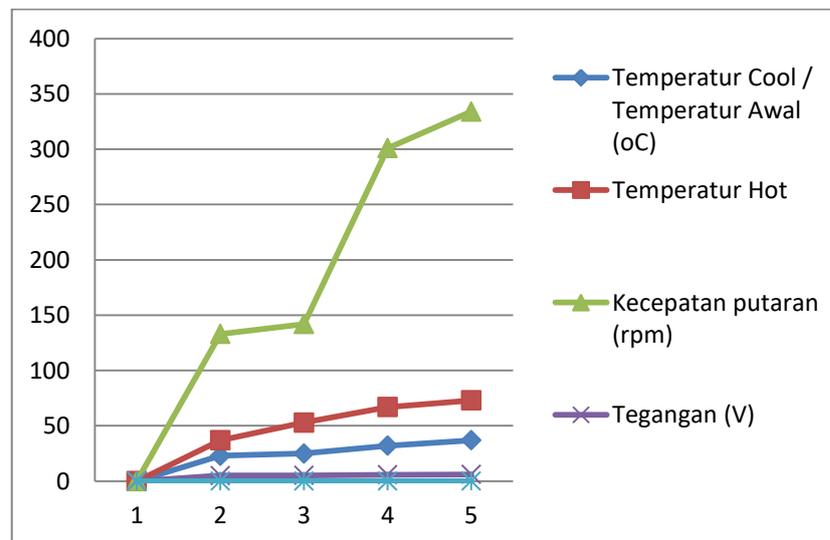
Hasil pengukuran keluaran arus dan tegangan dengan beban lampu 3 watt pada pembangkit listrik *hot air stirling engine* yang dihasilkan berbeda-beda. Tegangan pada waktu 5 detik dengan suhu dingin 32°C dan suhu panas 79°C dan kecepatan putaran roda stirling 343 rpm adalah 5.1 V dan arus 1.5 A. Tegangan pada waktu 10 detik dengan suhu dingin 42°C dan suhu panas 81°C dan kecepatan putaran roda stirling 382 rpm adalah 5.2 V dan arus 1.4 A. Tegangan pada waktu 15 detik dengan suhu dingin 46°C dan suhu panas 89°C dan kecepatan putaran roda stirling 388 rpm adalah 5.8 V dan arus 1.5 A. Tegangan pada waktu 20 detik dengan suhu dingin 55°C dan suhu panas 92°C dan kecepatan putaran roda stirling 391 rpm adalah 6.0 V dan arus 1.4 A.

Jika dibandingkan ada perbedaan kecepatan putaran diantara keluaran tanpa beban dan dengan beban. Itu disebabkan karena beban (lampu LED 3 watt)

harus menerima tegangan dan arus yang lebih besar untuk dapat menyala, oleh karena itu maka putaran roda stirling pun menjadi lebih pelan.



Gambar 4.1 Grafik Analisa Pembangkit Hot Stirling Engine Tanpa Beban



Gambar 4.2 Grafik Analisa Pembangkit Hot Stirling Engine Dengan Beban lampu 3 watt

1.2. Perhitungan Tegangan Rata-rata, Arus Rata-rata dan Faktor Kerja Tanpa Beban

Dari tabel 4.1 dapat melakukan perhitungan tegangan, arus dan daya rata-rata pada pembangkit listrik *hot air stirling engine* sebagai berikut:

- A. Tegangan rata-rata tanpa beban pembangkit listrik *hot air stirling engine*

$$\begin{aligned} V_{\text{rata-rata}} &= \frac{V1 + V2 + V3 + V4}{4} \\ &= \frac{4.8 + 4.8 + 4.9 + 5.0}{4} \\ &= 4.8 \text{ V} \end{aligned}$$

- B. Arus rata-rata tanpa beban pembangkit listrik *hot air stirling engine*

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I1 + I2 + I3 + I4}{4} \\ &= \frac{0.5 + 0.4 + 0.4 + 0.5}{4} \\ &= 0.4 \text{ A} \end{aligned}$$

- C. Faktor kerja pembangkit listrik *hot air stirling engine*

Untuk menghitung faktor kerja maka digunakan persamaan 2.4

$$P_{\text{rata-rata}} = V_{\text{rata-rata}} \cdot I_{\text{rata-rata}} \cdot \text{Cos } \phi$$

$$\text{Cos } \phi = \frac{4.8 \cdot 0.4}{4} = 1.92$$

$$\text{Cos } (0.48) = 0.99$$

1.3. Perhitungan Tegangan rata-rata, Arus rata-rata dan Faktor Kerja dengan beban

Dari tabel 4.2 dapat melakukan perhitungan tegangan, arus dan daya rata-rata pada pembangkit listrik *hot air stirling engine* sebagai berikut:

- A. Tegangan rata-rata pembangkit listrik *hot air stirling engine* dengan beban lampu 3 watt

$$\begin{aligned} V_{\text{rata-rata}} &= \frac{V_1 + V_2 + V_3 + V_4}{4} \\ &= \frac{5.1 + 5.2 + 5.8 + 6.0}{4} \\ &= 5.5 \text{ V} \end{aligned}$$

- B. Arus rata-rata pembangkit listrik *hot air stirling engine* dengan beban lampu 3 watt

$$\begin{aligned} I_{\text{rata-rata}} &= \frac{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}{4} \\ &= \frac{1.5 + 1.4 + 1.5 + 1.4}{4} \\ &= 1.4 \text{ A} \end{aligned}$$

- C. Faktor kerja pembangkit listrik *hot air stirling engine*

Untuk menghitung faktor kerja maka digunakan persamaan 2.4

$$P_{\text{rata-rata}} = V_{\text{rata-rata}} \cdot I_{\text{rata-rata}} \cdot \text{Cos } \phi$$

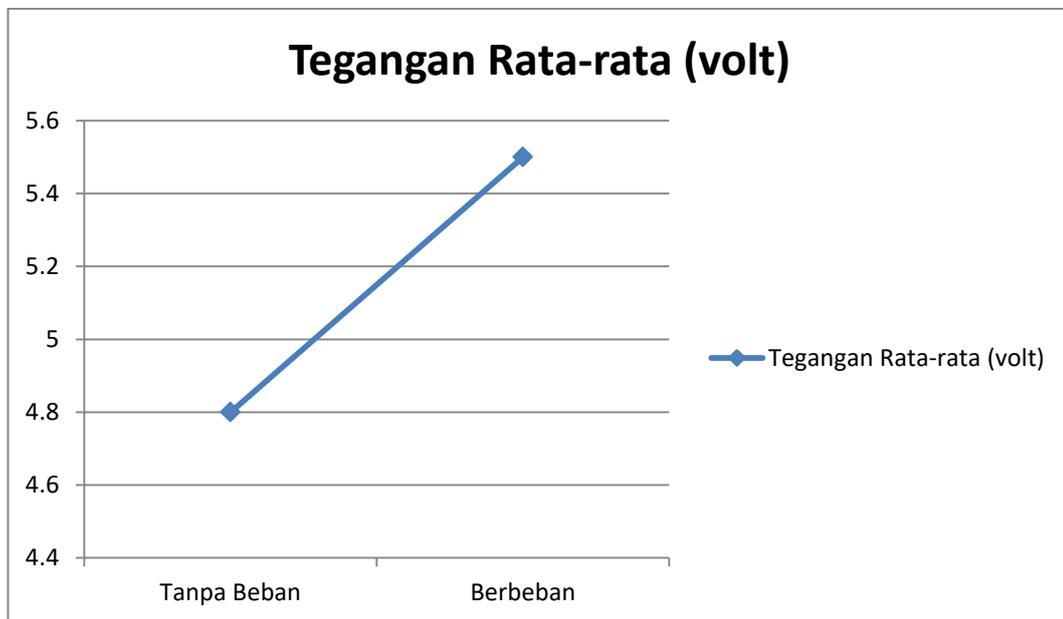
$$\text{Cos } \phi = \frac{5.5 \cdot 1.4}{4} = 1.92$$

$$\text{Cos } (1.92) = 0.99$$

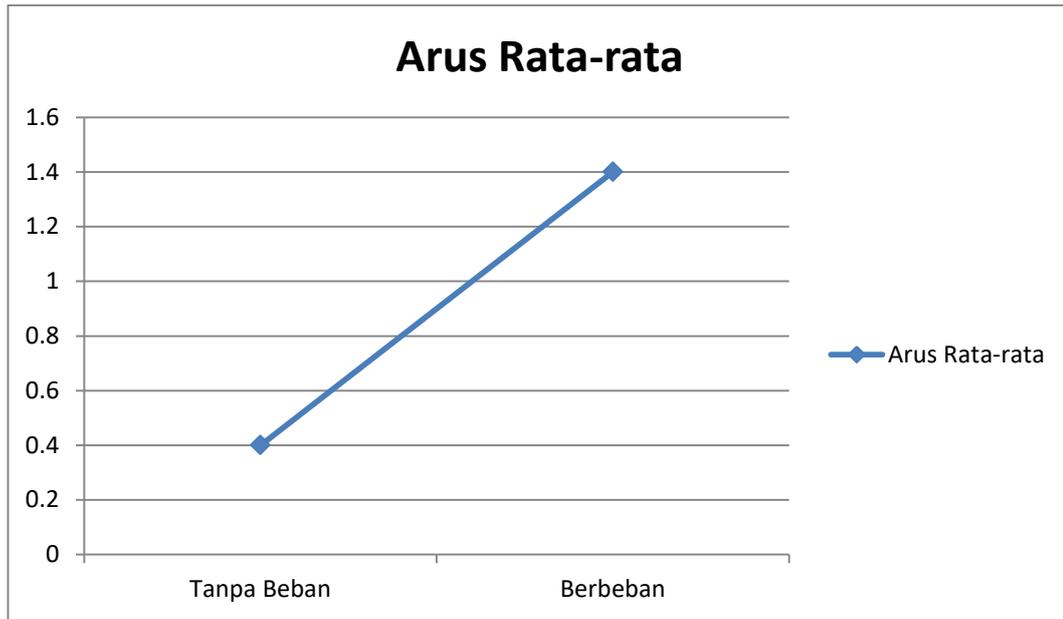
Dari hasil perhitungan output tegangan dan arus rata-rata maka dapat disimpulkan pada tabel 4.3

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan *Output* Tegangan dan Arus Rata-rata

Keterangan	Tegangan Rata-rata (volt)	Arus Rata-rata (ampere)
Tanpa Beban	4.8 V	0.4 A
Berbeban	5.5 V	1.4 A



Gambar 4.3 Grafik Tegangan Rata-rata Pembangkit Hot Stirling Engine



Gambar 4.4 Grafik Arus Rata-rata Pembangkit Hot Stirling Engine

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

1. Nilai tegangan yang dihasilkan pembangkit listrik hot air stirling menggunakan bahan bakar methanol tanpa beban lampu 3 watt berkisar antara 4.8 v sampai 5.0 v tergantung pada panas yang dihasilkan oleh bahan bakar methanol dan kecepatan putar flywheel yang menggerakkan rotor generator dan didapatkan rata-rata sebesar 4.8 v. Sedangkan jika diberi beban lampu 3 watt berkisar antara 5.1 v sampai 6.0 v dan didapatkan rata-rata sebesar 5.5 v.
2. Nilai arus yang dihasilkan pembangkit listrik hot air stirling menggunakan bahan bakar methanol tanpa beban lampu 3 watt adalah 0.4 A sampai 0.5 dan didapatkan rata-rata sebesar 0.4 A. Sedangkan jika diberi beban maka akan arus akan naik sebesar 1.4 A sampai 1.5 A dan juga bergantung pada panas yang dihasilkan oleh bahan bakar methanol dan kecepatan putar flywheel yang menggerakkan rotor generator dan didapatkan rata-rata sebesar 1.4 A.
3. Nilai faktor kerja/faktor daya yang dihasilkan dari pembangkit listrik hot air stirling menggunakan bahan bakar methanol tanpa beban lampu 3 watt senilai 0.999.

5.2 Saran

1. penelitian dapat dilanjutkan dengan lebih mengembangkan stirling engine menjadi lebih sempurna.
2. penelitian dapat dilanjutkan dengan menambah kapasitas generator sehingga dapat lebih dikembangkan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. P. Nazila, “UNJUK KERJA MESIN STIRLING TIPE GAMMA DAN SISTEM ALIRAN AIR PADA RESERVOIR RENDAH SKRIPSI Oleh : INTAN PUTRI NAZILA,” 2016
- [2] O. Soegihardjo and D. F. Teknik, “Perancangan Termodinamik Sirkuit Gas Motor Stirling FP150W dengan Metode Penskalaan (Scaling Method),” vol. 2, 2000.
- [3] S. Narayan and V. Gupta, “OVERVIEW OF WORKING OF STRILING ENGINES,” vol. 21, no. 4, pp. 45–53, 2015.
- [4] Al-Fikri. Harry Iqbal, “Analisis Pembangkit Listrik Dengan Generator Stirling,” vol. 91, pp. 399–404, 2017.
- [5] Syafriyudin, “Pembangkit Listrik Tenaga Panas Matahari Berbasis Mesin Stirling Engine.” pp. 187–192, 2013.
- [6] F. Tarbiyah and D. A. N. Keguruan, “Pengembangan alat peraga mesin stirling sederhana pada pokok bahasan termodinamika kelas xi sma.”
- [7] B. A. B. II, “No Title,” pp. 6–24, 2010.
- [8] Ahmad Yani, “RANCANG BANGUN PROTOTYPE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP MINI SEBAGAI MEDIA PRAKTIKUM MAHASISWA,” *Electrical*, vol. 7, no. 1, pp. 43–47, 2018.

- [9] B. A. B. Ii, "No Title," pp. 4–27, 1998.
- [10] Riyadi Prabowo Moecty, "Rekayasa mesin," *Electrical*, vol. XI, no. 2, pp. 93–106, 2016.
- [11] G. Alvianingsih, "Rancang bangun mesin stirling konfigurasi gamma low-temperature- differential sebagai penggerak mula pada pembangkit listrik skala kecil . = Design of a low- temperature-differential gamma type stirling engine as a prime mover for small scale of electrical power generation / Ginas Alvianingsih."
- [12] B. A. B. II and T. Pustaka, "No Title," no. 2017, pp. 1–22, 2013.
- [13] P. Prototipe, M. Stirling, and K. Kunci, "Irwns 2013," pp. 215–219, 2013.
- [14] D. Dan, P. Mesin, and S. Tenaga, "SKRIPSI Oleh : ZULFI FARIDA ALFIANTI," 2016.
- [15] I. Theresia, "Rancang Bangun Alat Cas Baterai dengan Metode Stirling Berbasis Mikrokontroler Atmega 328," 2017.
- [16] P. T. Mesin, J. Teknik, and I. Fakultas, "Skripsi Sebagai Persyaratan Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik," 2012.
- [17] A. Zikri *et al.*, "PEMANFAATAN LENS A FRESNEL SEBAGAI KOLEKTOR PANAS SURYA DENGAN MENGGUNAKAN MESIN STIRLING UTILIZATION OF FRESNEL LENS AS SOLAR THERMAL COLLECTOR," no. November 2017, pp. 8–15.

- [18] L. Agreement and W. Material, "Stirling Engine Assessment," vol. 3, no. 3, 2006.
- [19] K. Eksperimental and M. Stirling, "KAJI EKSPERIMENTAL MESIN STIRLING TIPE β MENGGUNAKAN VARIASI BAHAN BAKAR BIOMASSA," vol. 5, pp. 47–57, 2013.
- [20] B. A. B. Ii and L. Teori, "No Title," no. 2009, pp. 5–26, 2013.
- [21] J. Emitter, A. Budiman, A. R. Hakim, J. T. Elektro, F. Teknik, and U. M. Surakarta, "DESAIN GENERATOR MAGNET PERMANEN UNTUK," vol. 12, no. 1, pp. 59–67, 2005.
- [22] S. Idawati, U. Baso, B. Selviani, Sunarmi, P. S. Fisika, F. Sains, and U. C. Palopo, "PENGARUH SUHU TERHADAP PERPINDAHAN PANAS PADA MATERIAL YANG BERBEDA," vol. 7, no. 1, pp. 62–73, 2016.
- [23] HaGe. 2009. GENERATOR DC.
<http://dunia-listrik.blogspot.com/2009/01/generato-dc.html>. (9 Agustus 2019)
- [24] R.S.hartati, "Optimasi Pemasangan dan Kapasitas Kapasitor Shunt Pada Jaringan Distribusi Penjulung Menujangan " Vol.16 ,No.2 ,2017.
- [25] S. Fendy. 2011. Topologi Rangkaian Elektronika Daya Inverter (1)
<http://indone5ia.wordpress.com/2011/09/23/rangkaian-elektronika-daya-inverter-mengubah-tegangan-dc-ac/>. (9 Agustus 2019)



TUGAS AKHIR
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Kampus Utama Umsu, Jln. Kapt.MucktarBasri no.3 Medan 20238, Telp (061) 661059

LEMBARAN ASISTENSI

Nama : Basuendro Putro
NPM : 1407220078
Asistensi : Dosen Pembimbing I
**Judul : Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik *Hot Air*
Stirling Engine Dengan Bahan Bakar *Metanol*
Menggunakan Beban Listrik Bolak-Balik**

No	Tanggal	Uraian	Paraf
1.	1/12 - 19	Ace Jurnal	Sud-
2	2/1 - 19	Publiti kaja teni, rumus awal	Sud-
3	6/2 - 19	Publiti rajut yg kintal	Sud-
4	6/3 - 19	Publiti jnt tip inverte yg djal	Sud-
5	4/4 - 19	Pelija inverte yg dijul	Sud-
6	6/5 - 19	Publiti skematik rajutan	Sud-
7	6/6 - 19	Publiti metode kaji yg djal	Sud-
8	9/9 - 19	Ace Seminar	

Dosen Pembimbing I

(Noorly Evalina, ST, M.T)



TUGAS AKHIR
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
Kampus Utama Umsu, Jln. Kapt.MucktarBasri no.3 Medan 20238, Telp (061) 661059

LEMBARAN ASISTENSI

Nama : Basuendro Putro
NPM : 1407220078
Asistensi : Dosen Pembimbing II
Judul : Analisis Karakteristik Pembangkit Listrik *Hot Air Stirling Engine* Dengan Bahan Bakar Metanol Menggunakan Beban Listrik Bolak-Balik

No	Tanggal	Uraian	Paraf
1)	12/8/2018	Acc / v d d lanjut ke penelitian	
2)	4/10/2018	Acc BAB I dan lanjut BAB II berdasar kan penyelesaian yg telah di uraikan	
3)	3/2/2019	Acc BAB II lanjut ke BAB III	
4)	10/4/2019	Buat per samakan / permissi yg jelas dan buat keterangn uraian kan kapasitas tes peng gunaan beban bolak-balik metanol	
6)	20/8/2019	Acc BAB III dan lanjut flow chart penelitian nya	
7)	3/9/2019	data - data penelitian sebagai nya di masukkan ke tabel	
8)	10/9/2019	Acc untuk seminar	

Dosen Pembimbing II

(Zulfikar, ST, M.T)

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



DATA DIRI

NamaLengkap :BasuendroPutro
Panggilan :Endro
Tempat, TanggalLahir :Jakarta, 09Januari 1997
JenisKelamin : Laki-Laki
Alamat :JalanM.T HaryonoGG.SamadLk.IIIKec.Binjai Utara
Agama :Islam
Nama Orang Tua
Ayah : WisnuBusono
Ibu : Emma Andriana
No. HP :082274323250
E-mail :basuendroputro@yahoo.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

NomorPokokMahasiswa :1407220078
Fakultas :Teknik
Program Studi :TeknikElektro
PerguruanTinggi :UniversitasMuhammadiyah Sumatera Utara
AlamatPerguruanTinggi :Jl. KaptenMuchtarBasri BA. No. 3 Medan 20238

No	Tingkat Pendidikan	NamadanTempat	TahunKelulusan
1	SekolahDasar	SDN 020261	2008
2	SMP	SMPN 2 Binjai	2011
3	SMA	SMA Ahmad YaniBinjai	2014
4	MelanjutkanKuliah di UniversitasMuhammadiyah Sumatera Utara Tahun 2014SampaiSelesai.		