PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT

Skripsi

Oleh

ANISA RACHMAN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2017

ABSTRAK

PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT

OLEH

ANISA RACHMAN

Listrik saat ini sudah menjadi kebutuhan pokok bagi manusia baik untuk penerangan, kesehatan maupun pendidikan. Berdasarkan peta insolasi matahari, wilayah Indonesia memiliki potensi energi matahari yang cukup baik di beberapa daerah dengan intensitas rata-rata hariannya sekitar 4.5 kWh/m²/hari. Dengan menggunakan *solar dish concentrator,* energi matahari tersebut dapat dikonversi menjadi energi panas dengan temperatur berkisar antara 30 °C sampai dengan 300 °C. Energi panas matahari yang terkonsentrasi ini dapat dikonversi menjadi energi mekanik dengan menggunakan mesin Stirling. Mesin Stirling merupakan mesin termodinamika yang bekerja dengan menggunakan pembakaran luar dan memanfaatkan perbedaan volume serta tekanan.

Penelitian diawali dengan proses perancangan kemudian dilanjutkan dengan proses analisa hasil rancangan menggunakan Teori Shmidt dan hukum termodinamika II. Jenis mesin Stirling yang dipilih yaitu mesin Stirling tipe beta, dengan posisi piston panas/*displacer* dan piston dingin/daya berada pada satu garis/*line* serta berada dalam satu silinder.

Hasil rancangan mesin yang didapat yaitu mesin Stirlng tipe beta dengan sudut fasa x = 90°, volume sapuan piston ekspansi/panas V_{SE} sebesar 0,00110 m³, volume sapuan piston kompresi/daya V_{SC} sebesar 0,00027 m³, volume titik mati ruang ekspansi V_{DE} sebesar 0,00267915 m³, volume titik mati ruang kompresi V_{DC} sebesar 0,000321196 m³, volume regenerator V_R sebesar 7,06858x10^{-6} m³ dengan sistem penukaran panas berbentuk sirip sebagai sistem pendinginnya. Hasil perhitungan teori Schmidt didapatkan nilai tekanan maksimal yaitu sebesar $113336{,}636\ Pa$ yaitu pada sudut x = 0° dan 180, nilai volume momentum total sebesar $0{,}005243317\ m^3$ yaitu pada sudut x = 190°. Energi indikator W_i sebesar $1{,}520185213\ J$, daya indikator sebesar 12,6682 Watt dan efisiensi termal sebesar $47{,}1204\ \%$. Hasil analisis termal yang dilakukan menggunakan prinsip hukum termodinamika II didapatkan nilai entropi total sebesar 2,9487.10^{-13} J/kg.K, hal ini menunjukkan sistem pada mesin rancangan bersifat *irreversibel* dan dapat bekerja berdasarkan prinsip kenaikan entropi.

Kata Kunci : Mesin Stirling, Teori Schmidt, Mesin Stirling tipe beta, hukum termodinamika II.

ABSTRAC

DESIGNING STIRLING ENGINE TYPE BETA (β) USING THEORY SCHMIDT

By

ANISA RACHMAN

Electricity is a basic requirement for human beings in order to lighting, health and education. Based on the insolation map of the sun, some of the region in Indonesia has considerably high intensity potential of solar energy about 4.5 kWh / m² / day. By using solar dish concentrator, solar energy can be converted into heat energy with a temperature between 30° C to 300° C. Solar thermal energy can be converted to mechanical energy using Stirling engine. Stirling engine is a thermodynamic machine that works by using external combustion and utilizes volume and pressure difference.

Research begins with the design process and then proceed with the analysis of the design using Shmidt Theory and the second law of thermodynamics . The selected Stirling engine type is beta engine, with the position of heat piston/displacer and piston cool/power is in one line and one cylinder.

The result of the machine design is Stirlng beta type machine with phase angle x = 90°, sweep volume of expansion/heat piston V_{SE} is 0,00110 m³, sweep volume of piston compression/power V_{SC} 0.00027 m³, dead point volume of expansion space V_{DE} 0.00267915 m³, dead point volume of compression space V_{DC} 0.000321196 m³, volume of regenerator V_R 7.06858x10-6 m³ with a fin-shaped heat exchanger system as its cooling system. The result of Schmidt theory calculation is the maximum pressure value that is 113336,636 Pa at angle x = 0° and 180°, the total momentum volume is 0,005243317 m³ at angle x = 190°. Energy indicate W_i is 1.520185213 J, power indicate is 12,6682 Watt and thermal efficiency is 47,1204%. The result of thermal analysis using the second law of thermodynamics principle obtained a total entropy value of 2,9487. 10^{-13} J/kg.K, this shows the system on the machine design is irreversible and can work based on the increase of entropy principle.

Keywords: Stirling Engine, Schmidt Theory, Stirling Engine type beta, Second law of thermodynamics.

PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT

Oleh

ANISA RACHMAN

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA TEKNIK

Pada

Jurusan Teknik Mesin

Fakultas Teknik Universitas Lampung

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS LAMPUNG

2017

Judul Skripsi : **PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT**

Nama Mahasiswa : *Anisa Rachman*

Nomor Pokok Mahasiswa : 0915021002

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Dr. Amrizal, S.T., M.T.	**Dr. Amrul, S.T., M.T.**
NIP 19700202 199803 1 004	NIP 19710331 199903 1 003

2. Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ahmad Su'udi, S.T., M.T.
NIP 19740816 200012 1 001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua Penguji : **Dr. Amrizal, S.T., M.T.** .....

Anggota Penguji : **Dr. Amrul, S.T., M.T.** .....

Penguji Utama : **A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng.** .....

2. Dekan Fakultas Teknik

Prof. Dr. Suharno, M.Sc.
NIP 19620717 198703 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : **22 Desember 2016**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tugas akhir dengan judul:

PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT

Yang dibuat untuk melengkapi persyaratan menjadi Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung, bukan merupakan tiruan atau duplikasi dari tugas akhir yang dipublikasikan dari perguruan tinggi atau instasi manapun, sebagaimana diatur dalam pasal 44 peraturan akademik Universitas Lampung dengan surat keputusan Rektor No. 159/H26/PP/2008, kecuali bagian yang sumber informasinya dicantumkan sebagaimana mestinya.

Pembuat Pernyataan

METERAI TEMPEL
CF1D4AEF505559034
6000
ENAM RIBU RUPIAH

ANISA RACHMAN
NPM. 0915021002

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di kota seribu kenangan D.I. Yogyakarta tepatnya di Kabupaten Sleman pada tanggal 14 Nopember 1991, dari pasangan suami istri yang sederhana Ayahanda Suhadi A.Ptnh yang sangat keras didikannya namun berhati lembut dan pandai bercanda serta ibunda Tarsih Winartin yang selalu mengajarkan kepada anak-anaknya makna kerja keras dan jangan pernah berputus asa serta selalu mengingat Yang Maha Esa Allah S.W.T. Penulis merupakan anak ke dua dari tiga bersaudari yaitu kakak Nurul Widya Kurniawati A.Md dan adik Hanifah Nur'aini (inshaallah S.H.).

Profesi ayah sebagai abdi masyarakat pada salah satu instansi pemerintah Kantor Agraria dan Tata Ruang Negara (ATR) atau lebih dikenal dengan Badan Pertanahan Nasional (BPN) menjadikan keluarga penulis sering berpindah-pindah tempat tinggal dan sekolah. Sempat mengenyam pindidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Serui Kab. Yapen Waropen Papua dari kelas 1 – 3 dikarenkan mutasi pekerjaan ayah ke Prov.Lampung, penulis menyelesaikan sisa pendidikan Sekolah Dasar nya di SD Negeri 1 Tanjung Inten Kab. Purbolinggo Lampung Timur pada tahun 2003, dilanjutkan dengan pendidikan Sekolah Menengah Pertama di SMP Muhammadiyah 1 Purbolinggo Lampung Timur pada tahun 2006, serta menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Purbolinggo Lampung timur pada tahun 2009, dan pada tahun 2009 penulis terdaftar sebagai

Mahasiswa Strata Satu (S1) Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui Seleksi Masuk Bersama Perguruan Tinggi Negeri (SMBPTN) melalui jalur undangan.

Sebagai satu-satunya wanita dalam satu angkatan 2009 S1 Teknik Mesin, penulis menyibukkan diri dengan berbagai organisasi internal kampus diantaranya yaitu pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Bidang Penelitian dan Pengembangan (LITBANG) pada tahun 2010-2011, menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Teknik Mesin (HIMATEM) sebagai anggota Bidang Pendidikan dan Diklat (DIKLAT) pada tahun 2011-2012, menjadi pengurus Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI FT) sebagai anggota Bidang Kaderisasi pada tahun 2010-2011, menjadi pengurus Forum Silaturahmi dan Studi Islam Fakultas Teknik (FOSSI FT) sebagai Sekertaris Bidang Kaderisasi pada tahun 2011-2012, menjadi pengurus Dewan Perwakilan Mahasiswa Fakultas Teknik (DPM FT) sebagai Sekertaris Komisi III pada tahun 2012-2013.

Pada bidang akaedemik, penulis aktif pernah menjadi asisten dan asisten praktikum Laboraturium Mekanika Fluida dan Termodinamika pada Lab Terpadu Teknik Mesin Unila. Penulis melaksanakan Kerja Praktek (KP) di PT. Kereta Api Indonesia (*Persero*) Subdrive 111.2 Bandar Lampung dengan judul laporan KP "Analisa Efisiensi Kompresor Lokomotif cc 205" pada tahun 2015. Pada tahun 2014 penulis melakukan penelitian di bidang konsentrasi Konversi Energi dengan judul tugas akhir "*Perancangan Stirling Engine Tipe Beta (B) Menggunakan Teori Schmidt*" dibawah bimbingan bapak Dr. Amrizal, S.T., M.T. dan Dr. Amrul, S.T.,M.T..

MOTTO

"Dan segala nikmat yang ada padamu (datangnya) dari Allah, kemudian apabila kamu ditimpa kesengsaraan, maka kepada-Nyalah kamu meminta pertolongan"

(Q.S. An-Nahl:53)

"Jika seorang anak adam (manusia) meninggal, maka seluruh amalannya terputus kecuali tiga hal; sedekah jariah, ilmu yang bermanfaat dan anak sholih yang senantiasa mendoakannya"

(H.R.Muslim)

Jangan hanya melihat hasil dari sesuatu tapi lihatlah proses yang telah dijalaninya.

Inti Islam yaitu Sabar.

PERSEMBAHAN

Karya Ini Kupersembahkan Untuk

KEDUA ORANG TUA DAN KEDUA SAUDARIKU TERCINTA

REKAN-REKAN SEPERJUANGAN TEKNIK MESIN UNILA 2009

CIVITAS AKADEMIKA TEKNIK MESIN UNILA

ALMAMATER TERCINTA UNIVERSITAS LAMPUNG

TANAH AIR KU

INDONESIA

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr Wb

Allhamdulillahirobbilalamin, Puji syukur senantiasa saya panjatkan kehadirat Allah S.W.T, atas segala nikmat dan karunianya yang telah memberikan kesehatan kepada penulis sehingga terselesainya laporan Tugas Akhir dengan mempersembahkan judul "*Perancangan Stirling Engine Tipe Beta (B) Menggunakan Teori Schmidt*" dengan sebaik-baiknya. Shalawat beriring salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan seluruh alam dan kekasih Allah S.W.T Nabi Muhammad S.A.W dan para sahabat serta para tabi`in yang selalu istiqomah di atas jalan agama islam hingga ajal menjemput.

Dalam pengerjaan dan penyususan Tugas Akhir ini penulis banyak mendapatkan bimbingan, motivasi, dukungan dan bantuan baik moral maupun materiil oleh berbagai pihak. Pada kesempatan ini penulis dengan sepenuh hati mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah S.W.T. yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada duanya.

2. Ayahanda tercinta Suhadi,A.Ptnh , Ibunda terkasih Tarsih Winartin dan kak Nurul Widya Kurniawati serta adik Hanifah Nur'aini atas kasih sayang dan perhatian mereka yang tak terbatas selama saya kuliah.
3. Prof. Dr. Ir. Hasriadi Mat Akin, M.P., selaku Rektor Universitas Lampung.
4. Prof. Suharno MS, M.Sc., PhD selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung
5. Bapak Ahmad Su'udi, S.T.,M.T., selaku Ketua Jurusan S1 Teknik Mesin yang menjadi motivator serta membimbing saya selama saya mengalami kesulitan dalam perkuliahan.
6. Bapak Harnowo Supriadi, S.T., M.T., selaku Sekertaris Jurusan S1 Teknik Mesin yang menjadi tempat berkeluh kesah dan membantu saat menghadapi masalah administrasi kampus.
7. Bapak Dr. Amrizal, S.T., M.T., selaku dosen pembimbing utama tugas akhir ini, tak hentinya selalu membimbing serta memberikan waktu, ide pemikiran, masukan, serta ilmu yang sangat bermanfaat dan membantu bagi penulis.
8. Bapak Dr. Amrul, S.T.,M.T., selaku dosen pembimbing kedua tugas akhir ini, selalu membimbing serta memberikan waktu, kritik, saran dan ide pemikiran bagi penulis.
9. Bapak A. Yudi Eka Risano, S.T., M.Eng., selaku dosen penguji tugas akhir ini, selalu memberikan waktu, kritik, saran dan ide pemikiran bagi penulis.

10. Bapak Indra Mamad G, S.T.,M.T., selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan S1 Teknik Mesin Universitas Lampung yang selalu memberi motivasi dan kemudahan dalam pelaksanaan seminar-seminar tugas akhir.

11. Bapak Jorfri Boike Sinaga, S.T., M.T., selaku dosen dan teman *brainstorming* tak hentinya meluangkan waktu, serta meberikan ide-ide dan motivasi bagi penulis.

12. Seluruh dosen Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung atas ilmu yang telah diberikan kepada penulis selama penulis menjalani masa studi di perkuliahan.

13. Staf akademik Pak. Marta, Pak. Dadang, Pak Nanang serta Teknisi-teknisi Laboraturiom Terpadu Teknik Mesin Unila, Pak Giman (Lab. Mekflud), Pak Agus (Lab. Motor Bakar). Pak. Joko (Lab. Metalurgi), Pak. Agus (Lab. Produksi), Pak. Wono (Lab. Material), Pak. Pono (Lab. Produksi) yang telah banyak membantu sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini.

14. Rekan-rekan seperjuangan tugas akhir Mesin Stirling tenaga matahari Wahyu Nanda P, Muzzamil dan Ranny Dwidayanti S.T., terimakasih atas kebersamaan dan perjuangannya selama ini.

15. KAIZEN Girls; Rabiah Surrianingsih, Izma Yanti dan Jumaliya Abdul Rosyid, terimakasih atas *sisterhood* nya, inshaallah dapat membangun peradaban wanita mesin yang berkualitas.

16. Mei, Bowo, Rizal, Rizki, Todi, Acong, Iqbal, Lingga dan seluruh rekan-rekan Teknik Mesin khususnya 2009 terimakasih untuk kebersamaan yang telah

dijalani. Tiada kata yang dapat penulis utarakan untuk mengungkapkan perasaan senang dan bangga menjadi bagian dari angkatan 2009. "*Salam Solidarity Forever".*

17. Rekan-rekan Besbeng Mardiyah, Ranny, k Ped, Binsar, Mbeu, Botoy, Albert, Nora, Riyo, Topik, Ateng, terimakasih atas persaudaran, bantuan serta ilmu perbedaan dan kebersamaan yang kalian berikan.

18. KUKIS (Komunitas Kreativitas) UNILA ; El, Titin, Isma, Tata, Putu, Ali dan seluruh rekan-rekan anggota lainnya yang tisak bisa saya sebutkan satu-persatu, *always be creative and intelligent engginer!!*

19. Dan semua pihak yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu terimakasih atas bantuan dan dukungan nya.

Akhir kata, penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan laporan Tugas Akhir ini, oleh karenanya kritik dan saran yang sifatnya membangun sangat penulis harapkan. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca umumnya dan untuk penulis pada khusus nya, semoga Allah S.W.T memberikan kemudahan dan kesuksesan pada kita semua. Amin

Wassalamu'alaikum Wr. Wb.

Bandar Lampung, 27 Februari 2017

Penulis

ANISA RACHMAN

NPM. 0915021002

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK ..... **ii**

HALAMAN JUDUL ..... **iv**

HALAMAN PERSETUJUAN ..... **v**

HALAMAN PENGESAHAN .... **v**.

PERNYATAAN PENULIS ..... **vi**

RIWAYAT HIDUP ..... **viii**

MOTTO ..... **x**

PERSEMBAHAN ..... **xi**

SANWACANA ..... **xii**

DAFTAR ISI ..... **xvi**

DAFTAR GAMBAR ..... **xix**

DAFTAR TABEL ..... **xxii**

DAFTAR LAMPIRAN ..... **xxiii**

DAFTAR SIMBOL ..... **xxiv**

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang 1

1.2. Tujuan 4

1.3. Batasan Masalah 4

1.4. Sistematika Penulisan 4

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin Stirling 6

2.2. Sejarah Awal Mesin Stirling 7

2.3. Siklus Stirling 8

2.4. Jenis-jenis Mesin Stirling 13

2.5. Teori Schmidt 15

2.6. Keseimbangan Energi Siklus Mesin Stirling. 24

2.7. Kolektor Surya 28

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metodologi Penelitian 37

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian 47

3.3. Alur Penelitian 47

BAB IV. DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Teknis Mesin Stirling 48

4.2. Kondisi Termodinamika Dalam Analisis *Thermal* 51

4.3. Parameter Berdasarkan Kondisi Termodinamika 55

4.4. Diagram P – v Dan Hasil Analisis *Thermal* Rancangan Mesin Stirling..... 61

4.5. Energi, Daya dan Efisiensi Indikator Hasil Analisis *Thermal* Rancangan..... 64

4.6. Diagram Θ - s Dan Hasil Analisis Keseimbangan Energi Siklus Mesin Stirling..... 66

4.7. Pembahasan..... 72

4.8. Variabel Perhitungan Analisis *Thermal*..... 76

BAB V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan 82

5.2. Saran 83

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 1.1. HDI dunia vs Konsumsi listrik (Krothapalli., 2005). 1

Gambar 2.2. Stirling Engine..... 7

Gambar 2.3. Diagram T-s Silkus Stirling..... 11

Gambar 2.4. Diagram P-v siklus Stirling 11

Gambar 2.5. Mesin Stirling tipe alpha 14

Gambar 2.6. Mesin Stirling tipe gamma 14

Gambar 2.7. Mesin Stirling tipe beta 15

Gambar 2.8. Diagram Θ-s untuk siklus mesin Stirling 27

Gambar 2.9. Gambaran penampang kolektor plat datar. 29

Gambar 2.10. Skema kolektor menggunakan parabola 31

Gambar 2.11. Diagram skema LFR 32

Gambar 2.12. Skema sistem pembangkit heliostat 33

Gambar 2.13. Skema sistem piringan parabola *(parabolic dish*)..... 33

Gambar 2.14. Konsep tentang mesin dish/Stirling menampilkan 3 komponen utama yaitu Konsentrator, receiver, dan mesin stirling/ alternator (William B. Stine, 1994) 36

Gambar 3.15. *Flowchart* desain mesin Stirling 38

Gambar 3.16. Tampak samping struktur dasar rancangan mesin Striling yang dibuat (satuan dalam mm). 40

Gambar 3.17. Tampak belakang struktur dasar rancangan mesin Striling yang dibuat (satuan dalam mm) 40

Gambar 3.18. Mekanisme kruk as yang digunakan. 41

Gambar 3.19. Sirip sebagai alat penukar panas. 41

Gambar 3.20. Regenerator 42

Gambar 3.21. Diagram Θ – s Siklus Mesin Stirling (ŠKORPÍK, 2012)..... 43

Gambar 3.22. Skema *assembling* unit pemisah air garam tenaga matahari/ *solar desalitanion unit* (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016) 45

Gambar 3.23. Pemanasan Dinamik Spesimen 2 (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016) 46

Gambar 3.24. Diagram Alur penelitian Rancangan Stirling Engine..... 47

Gambar 4.25. Mesin Stirling type Beta skala lab hasil rancangan..... 49

Gambar 4.26. Konfigurasi mesin 51

Gambar 4.27. Grafik P – v Hasil Perhitungan Analisa *Thermal*..... 63

Gambar 4.28. Diagram Θ – s Hasil Perhitungan Analisis *Thermal*..... 71

Gambar 4.29. Grafik P – v Hasil Perhitungan Analisa *Thermal*..... 72

Gambar 4.30. Diagram Θ – s Hasil Perhitungan Analisis *Thermal*..... 74

Gambar 4.31. Diagram Θ – s Siklus Mesin Stirling 75

Gambar 4.32. Estimasi energi yang dihasilkan dengan temperatur kompresi berdasarakan variabel temperatur ekspansi. 79

Gambar 4.33. Estimasi daya yang dihasilkan dengan temperatur kompresi berdasarakan variabel temperatur ekspansi. 80

Gambar 4.34. Efisiensi yang dihasilkan dengan temperatur kompresi berdasarakan variabel temperatur ekspansi. 81

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1. Kolektor Energi surya (Kalogirou, 2004) 29

Tabel 3.2. Target Rancangan Mesin Stirling 38

Tabel 3.5. Parameter Parabola (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016)..... 44

Tabel 4.4. Daftar bagian-bagian rancangan mesin Stirling..... 49

Tabel 4.8. Data Teknis 50

Tabel 4.9. Hasil Perhitungan Analisis *Thermal* untuk diagram P -v 61

Tabel 4.10. Tabel Hasil Perhitungan untuk Diagram Θ - s..... 69

Tabel 4.11. Tabel Hasil Perhitungan Variasi Temperatur Terhadap Perkiraan Performa Mesin 76

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran

1. *Blueprint* Rancangan Mesin Striling tipe Beta
2. Data Hasil Perhitungan pada lembar Excel.

DAFTAR SIMBOL

P	Tekanan Mesin	Pa
V_{SE}	Volume sapuan piston ekspansi/*displacer*	m^3
V_{SC}	Volume sapuan piston kompresi/daya	m^3
V_{DE}	Volume titik mati piston ekspansi/*displacer*	m^3
V_R	Volume regenerator	m^3
V_{DC}	Volume titik mati piston kompresi/daya	m^3
V_E	Volume momental ruang ekspansi	m^3
V_C	Volume momental ruang kompresi	m^3
V	Volume momental total	m^3
R	Konstanta gas	J/kg.K
T_H	Temperatur ruang ekspansi	K
T_C	Temperatur ruang kompresi	K

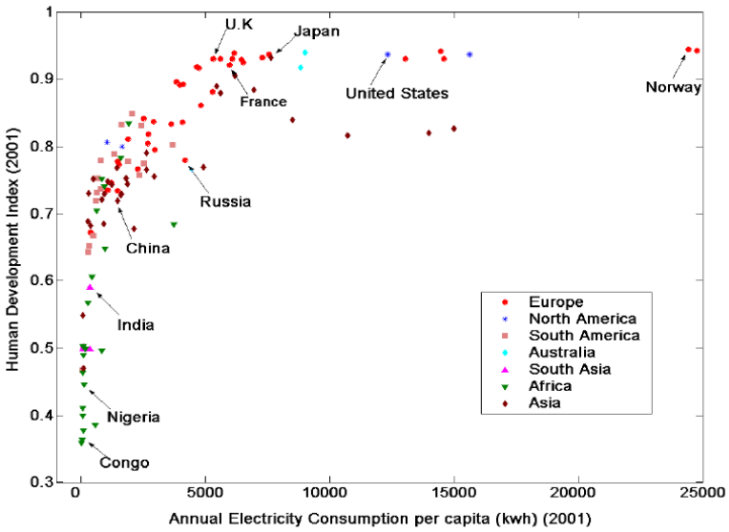
dx	Sudut phasa	deg
t	Rasio temperatur	-
v	Rasio volume sapuan	-
X	Rasio volume titik mati	-
n	Kecepatan mesin	RPM
W_E	Energi ekspansi indikator	J
W_C	Energi kompresi indikator	J
W_i	Energi indikator	J
L_E	Daya ekspansi indikator	W
L_C	Daya kompresi indikator	W
L_i	Daya indikator	W
e	Efisiensi	%
Θ	Rasio antara temperatur rata-rata gas kerja didalam mesin dengan temperatur maksimum gas kerja didalam mesin	-
T_x	Temperatur pada rotasi sudut x.	K
$T_{x,max}$	Temperatur pada rotasi sudut x yang paling	K

	maksimal dalam satu siklus.	
P_x	Tekanan pada rotasi sudut x.	Pa
V_x	Volume total sesaat/momental pada rotasi sudut x	m^3
$(P_x V_x)_{max}$	Tekanan dan volume total sesaat/momental pada rotasi sudut x yang paling maksimal dalam satu siklus.	Pa.m^3
s	Entropi spesifik	J/kg.K
c_v	Panas spesifik pada volume konstan	J/kg.K
f	Jarak titik fokus/*focal lenght*	m
θ_{lim}	Sudut penerimaan/*acceptance angle*	deg
φ_r	Sudut lingkaran/*rim angle*	deg

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Dunia saat ini sangat bergantung pada energi. Baik itu untuk kesehatan, gaya hidup, ataupun pendidikan. Hal-hal tersebut sangat mempengaruhi kualitas hidup seseorang. Salah satu ukuran kuantitatif kualitas hidup adalah *Human Development Index* (HDI). HDI menggabungkan tingkat penghidupan, literasi, pendidikan dan pendapatan per kapita dari berbagai negara. Gambar 1.1 menunjukkan perbandingan antara HDI dengan penggunaan listrik untuk berbagai negara serta dapat melihat korelasi yang jelas antara konsumsi listrik dan kuantitas kualitas hidup (HDI).



Gambar 1.1. HDI dunia vs Konsumsi listrik (Krothapalli., 2005).

Kebutuhan listrik di Indonesian pada 22 wilayah pemasaran listrik PLN selama kurun waktu 17 tahun (2003 s.d. 2020) diperkirakan tumbuh sebesar 6,5% per tahun dari 91,72 TWh pada tahun 2002 menjadi 272,34 TWh pada tahun 2020 perhitungan ini diambil dari keseluruhan sektor yaitu sektor industri, rumah tangga, usaha, umum, dan lainnya.

Dua hal mendasar yang memberatkan pemanfaatan sumber energi berbasis fosil adalah bahwa ketersediaan sumber daya alam ini sangat terbatas dan berdampak negatif terhadap lingkungan lokal serta global. Sebagai contoh keterbatasan sumber energi primer adalah produksi minyak bumi nasional sudah menurun sehingga untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri saja sudah harus melakukan impor (EIA, 2006). Sementara itu, cadangan gas nasional juga akan mengalami skenario yang sama bahwa sekitar 20 tahun lagi, gas sudah harus diimpor untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri (Widianto, 2007). Dengan demikian, maka kondisi pasca bahan bakar fosil ini harus mulai diantisipasi sejak dini dengan melakukan konservasi energi, diversifikasi sumber energi dan menggali sumber serta teknologi energi baru, dan memasyarakatan pemanfaatan teknologi energi listrik terbarukan yang sudah siap.

Berdasarkan peta insolasi matahari, wilayah Indonesia memiliki potensi energi matahari yang cukup baik di beberapa daerah dengan intensitas rata-rata hariannya sekitar 4.5 kWh/m^2/hari. Hal ini tentu sangat potensial dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik mengingat beratnya permasalahan yang terkait dengan pembangkitan listrik berbahan bakar fosil (Kumara, 2010). Penelitian yang telah dilakukan dengan menggunakan *solar dish concentrator* berdiameter-*d* 0,68 m, jarak titik fokus ke permukaan/*focal lenght-f* 0,5557 m, sudut

penerimaan/*acceptance angle-*θ_{lim} 4,91° dan sudut lingkaran/*rim angle-*φ_r 35,40° dapat mengkonversi energi surya tersebut menjadi energi panas dengan temperatur antara 32°C sampai dengan 319°C (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016). Energi panas matahari yang terkonsentrasi ini dapat dikonversi menjadi energi mekanik dengan menggunakan mesin Stirling.

Mesin Stirling merupakan mesin termodinamika yang bekerja dengan menggunakan pembakaran luar dan memanfaatkan perbedaan volume serta tekanan. Mesin stirling pada umumnya memiliki cara kerja memanfaatkan sifat dasar udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuaian dan penyusutan sehingga sebuah mesin dapat berputar. Proses tersebut mengakibatkan adanya perbedaan tekanan yang akhirnya menghasilkan ekspansi dari fluida kerjanya. Ekspansi inilah yang dimanfaatkan untuk dikonversi menjadi kerja oleh piston yang kemudian dihubungkan ke poros engkol (*crankshaft*) agar menjadi kerja mekanik. Poros engkol ini kemudian dihubungkan ke *flywheel* agar dapat terjadi siklus berikutnya. Mesin Stirling dapat disambungkan dengan generator, sehingga energi mekanik yang dihasilkan dari mesin stirling dapat diubah menjadi energi listrik. Mesin yang dapat memanfaatkan energi baru terbarukan dari matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik inilah yang dibutuhkan guna mengantisipasi kurangnya sumber energi fosil di Indonesia khususnya untuk memenuhi kebutuhan listrik skala rumah tangga di daerah terpencil. Hal ini lah yang melatarbelakangi penelitian yang dilakukan, yaitu mengenai perancangan komponen, mekanisme serta analisis desain dari mesin stirling skala laboratorium

dengan judul "**PERANCANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE BETA (β) MENGGUNAKAN TEORI SCHMIDT**"

1.2. Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Merancang mesin Stirling mulai dari sistem kerja serta komponennya untuk mendapatkan data teknis yang dibutuhkan sebagai bahan analisis.
2. Menghitung tekanan indikator, volume momentum total indikator, energi indikator, daya indikator dan efisiensi dari hasil rancangan.
3. Menghitung entropi indikator dari hasil rancangan.

1.3. Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini yaitu:

1. Rancangan tipe mesin *Stirling* yang dibuat adalah tipe beta (β)
2. Data temperatur yang dipakai berdasarkan hasil penelitian *Solar Dish Concentrator For Desalting Water* oleh Prado.G.O.

1.4. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang terdapat pada laporan penelitian ini terdiri dari:

Bab I. Pendahuluan. Bab ini berisi latar belakang, tujuan, batasan masalah dan sistematika penulisan.

Bab II. Tinjauan Pustaka. Pada bab ini memuat teori mengenai hal-hal yang berkaitan dengan penelitian, yaitu: pengertian mesin Stirling, sejarah awal mesin Stirling, siklus mesin Stirling, jenis-jenis mesin Stirling, teori schmidt.

Bab III. Metodologi Penelitian. Pada bab ini terdiri atas hal-hal yang berhubungan dengan pelaksanaan penelitian, yaitu metode penelitian, konsep dan struktur dasar perancangan, alur penelitian.

Bab IV. Data Dan Pembahasan. Pada bab ini berisikan hasil dan pembahasan dari data-data yang diperoleh.

Bab V. Penutup. Pada bab ini berisi hal-hal yang dapat disimpulkan dan saran-saran yang ingin disampaikan dari penelitian yang dilakukan.

Daftar Pustaka. Memuat referensi yang digunakan penulis untuk menyelesaikan laporan tugas akhir.

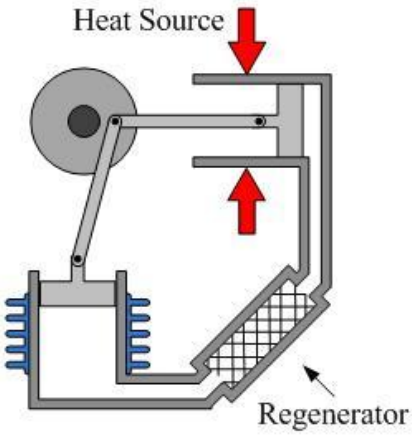
Lampiran. Berisikan perlengkapan laporan penelitian.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Mesin Stirling

Mesin Stirling merupakan perangkat mekanik yang beroperasi pada siklus termodinamika regeneratif tertutup, dengan siklus kompresi dan ekspansi fluida kerja pada tingkat suhu yang berbeda. Alirannya dikendalikan oleh perubahan volume dan ada total perubahan atau konversi dari panas ke kerja ataupun sebaliknya (Graham, 1980).

Stirling engine pada umumnya memiliki cara kerja memanfaatkan sifat dasar udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuaian dan penyusutan sehingga sebuah mesin dapat berputar. Dari definisi tadi dapat ditarik kesimpulan bahwa *Stirling engine* akan bekerja atau berputar jika terdapat perbedaan temperatur. Perbedaan temperatur tersebut mengakibatkan adanya perbedaan tekanan yang akhirnya menghasilkan ekspansi dari fluida kerjanya. Ekspansi inilah yang dimanfaatkan untuk dikonversi menjadi kerja oleh piston yang kemudian dihubungkan ke poros engkol (*crankshaft*) agar menjadi kerja mekanik (gambar 2.2.). Poros engkol ini kemudian dihubungkan ke *flywheel* agar dapat terjadi siklus berikutnya (Kwankaomeng, 2008).



Gambar 2.2. Stirling Engine

2.2. Sejarah Awal Mesin Stirling

Mesin Stirling dan Ericson memiliki sejarah cukup panjang, telah diteliti dengan sangat baik oleh Finkelstein (1959), Zarinchang (1972) dan Ross (1977). Robert Stirling sebagai penemu awal mesin panas regeneratif, menemukan mesin regeneratif siklus tertutup pada tahun 1816 dan mengembangkannya bertahun-tahun bersama saudaranya James Stirling. Dengan seluruh pengembangan teknik yang ada, penelitian mereka tertahan pada terbatasnya material sehingga pada akhir hidupnya tahun 1876 Robert Stirling menuliskan :

'These imperfections have been in a great measure removed by time and especially by the genius of the distinguished Bessemer. If Bessemer iron or steel had been known thirty-five or forty years ago there is scarce a doubt that air engine would have been a great succes... it remains for some skilled and ambitious mechanist in a future age to repeat it under more favourable circumstances and with complete succes...'

(Graham, 1980)

Perkembangan penelitian untuk mesin Stirling masih berlanjut sampai dengan tahun 1980-an dan awal 1990-an, Profesor Senft dari Universitas Winconsin mengambil gagasan mesin Stirling dengan perbedaan suhu rendah/*low differential temperature Stirling engine*. Model pertama yang dihasilkan adalah mesin Ringbom, dimana mesin tersebut tidak memiliki hubungan langsung antara roda gila dan *displacer*, mesin Ringbom sangat tergantung pada perubahan tekanan didalam ruang utama untuk menggerakkan *displacer* kembali ke pisisi awal dan sebagainya.

Pada tahun 1992 Professor Senft diminta untuk merancang dan membangun sebuah mesin Stirling dengan perbedaan suhu rendah untuk NASA yang dinamakan N 92. Professor Senft terus bekerja mengembangkan mesin Stirling dan telah menulis beberapa buku rincian sejarah dan pembuatan mesin Stirling.

2.3. Siklus Stirling

Hukum termodinamika I dan II digunakan serta berlaku untuk semua mesin panas/ *thermal engine* termasuk mesin Stirling. Ketika sebuah mesin memenuhi semua aspek dalam Hukum termodinamika I dan II maka segala hal dalam mesin itu dapat dijelaskan. Pemahaman dan keyakinan mengenai hukum termodinamika diperlukan untuk dapat memahami secara mendalam mengenai mesin panas regeneratif.

Proses yang terjadi pada mesin panas sederhana bagaimanapun masih rumit sehingga tidak mungkin untuk menghitung secara tepat apa yang terjadi pada

mesin. Sebaliknya dibuatlah model teoritis yang diasumsikan, didalamnya mengandung berbagai keadaan yang diidealisasikan sejauh yang diperlukan untuk membuat analisis dari kemungkinan pengoperasiannya. Dalam hal ini, pengoperasian hampir seluruh jenis mesin dapat disimulasikan dengan menggunakan asumsi dari urutan berulang proses termodinamika yang biasa disebut siklus. Masing-masing proses diasumsikan menjadi salah satu fungsi berubah dalam fungsi termodinamika yang terjadi pada fluida bergerak dari satu kondisi ke kondisi lain, namun ada satu fungsi yang dipertahankan konstan. Kondisi termodinamika penting yaitu tekanan (P), volume (V), temperatur (T), energi dalam (U), entalpi (W) dan entropi (S).

Sebuah siklus dapat dipresentasikan dalam gambar dengan beberapa cara. Dua bentuk presentasi yang sangat membantu dalam analisis operasi mesin panas yaitu diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-S). Kedua diagram tersebut sangatlah penting dikarenakan area didalam diagram P-V mengambarakan kerja yang dihasilkan dan area didalam diagram T-S menggambarkan proses perpindahan panas.

Stirling engine adalah mesin *thermal* dengan beberapa piston yang di dalamnnya terdapat gas kerja dengan masa konstan (seperti gas, udara, helium atau hidrogen). Secara teoritis, siklus kerja termodinamik dari mesin ini terdiri dari dua proses isotermal dan dua proses isohoric (gambar 2.3., 2.4.) atau lebih terkenal dengan siklus Stirling.

Yang membedakan siklus Stirling dengan siklus-siklus yang lainya yaitu adanya dua proses regenerasi volume konstan. Regenerasi yaitu proses dimana panas

ditransferkan ke alat penyimpan energi panas (biasa disebut *regenerator*) saat salah satu bagian proses dari siklus dan ditransferkan kembali ke fluida kerja pada saat salah satu bagian dari proses siklus lainnya.

Empat proses yang benar-benar *reversibel* berlangsung dalam siklus Stirling yaitu:

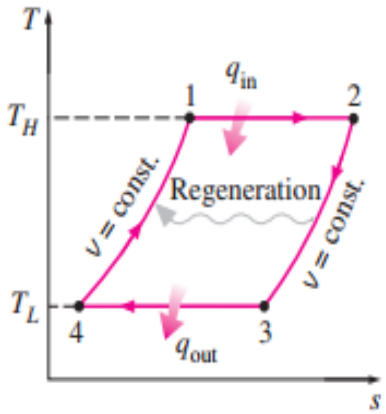
1 – 2 *T* = ekspansi konstan (penambahan panas dari sumber luar)

2 – 3 *v* = regenerasi konstan (panas *internal* ditransferkan dari fluida kerja ke *regenerator*)

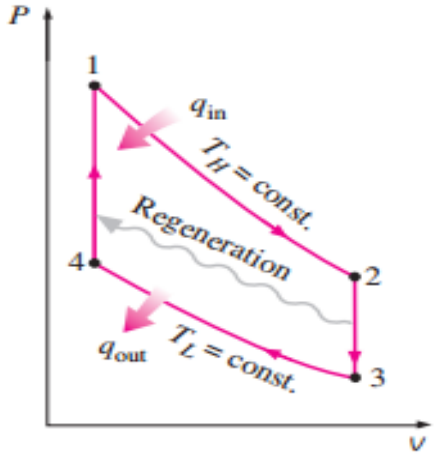
3 – 4 *T* = kompresi konstan (panas dibuang ke pembuangan luar)

4 – 1 *v* = regenerasi konstan (panas *internal* ditransferkan kembali dari *regenerator* ke fluida kerja)

Untuk perhitungan energi yang dibutuhkan ke empat siklus Stirling tersebut, mula-mula kita dapat mengasumsikan silinder mesin berisi *m* kg udara pada keadaan awal, yang ditunjukkan oleh titik 1 (Cengel & Boles, 2006).



Gambar 2.3. Diagram T-s Silkus Stirling



Gambar 2.4. Diagram P-v siklus Stirling

<u>Tingkat pertama</u>

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

∴ Kalor yang diberikan = kerja yang dilakukan selama proses isotermal

$$Q_1 = p_1 v_1 ln \frac{v_2}{v_1}$$

$$= mRT_1 ln \frac{v_2}{v_1}$$

$= mRT_1 \ln r$ ... (r = v_2/v_1, rasio ekspansi).....(1)

<u>Tingkat kedua</u>

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

Kalor yang dilepaskan ke generator $= mC_v\ (T_2 - T_3)$ .....(2)

Tingkat ketiga

Udara dikompresi secara isotermal di dalam silinder mesin dari v_3 ke v_4. Lagi kalor dibuang oleh udara.

Kalor yang dilepaskan oleh udara :

$$Q_2 = p_3 v_3 ln \frac{v_3}{v_4}$$

$$= mRT_3 ln \frac{v_3}{v_4}$$

$= mRT_3 \ln r$ ... (r = v_3/v_4, rasio ekspansi) .....(3)

Tingkat keempat

Terakhir, udara dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_1 dengan melewatkan udara ke *regenerator* dalam arah yang berlawanan dengan proses 2-3. Pada proses ini kalor diserap oleh udara dari *regenerator* selama proses ini, yaitu proses 4-1.

Kalor yang diserap oleh udara

$= mC_v\ (T_1 - T_4) = mC_v\ (T_1 - T_3)$... (karena $T_3 = T_4$) .....(4)

Terlihat bahwa kalor yang dilepaskan ke *regenerator* selama proses 2-3 adalah sama dengan kalor yang diambil dari *regenerator* selama proses 4-1. Jadi, tidak ada pertukaran kalor ke sistem selama proses-proses ini. Pertukaran kalor hanya terjadi selama dua proses isotermal.

$\therefore$ Kerja yang dilakukan = Kalor yang disuplai – kalor yang dibuang

$= mRT_1 \ln r - mRT_3 \ln r$

$= mR \ln r\ (T_1 - T_3)$ ..... (5)

dan efisiensi :

$$\eta = \frac{Kerja\ yang\ dilakukan}{Kalor\ yang\ disuplai} = \frac{mR \ln r\ (T_1 - T_3)}{mRT_1 \ln r}$$

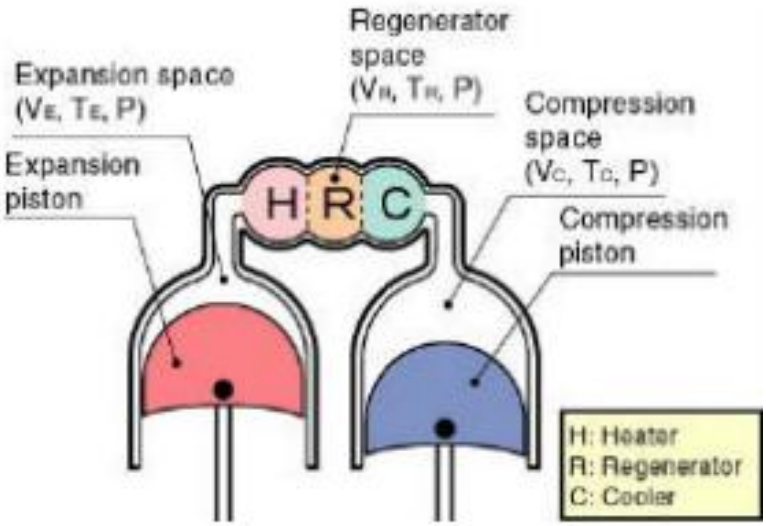
$$= \frac{T_1 - T_3}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_1} \quad \text{..... (6)}$$

Stirling engine harus mempunyai dua piston, satu power piston dan satu *displacer* (Homutescu, et al., 2003) yang terletak pada dua silinder yang berbeda (tipe alpha dan gamma) atau dalam satu silinder (tipe beta).

2.4. Jenis-jenis Mesin Stirling

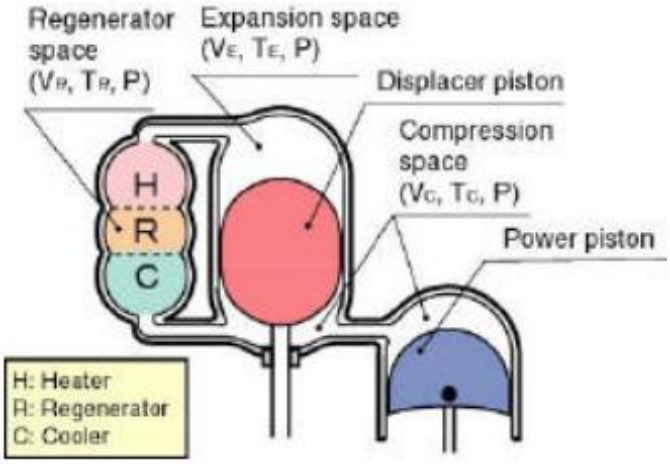
1. Tipe alpha (α)

Mesin Stirling tipe alpha (gambar 2.5) memiliki dua atau lebih piston terpisah yang secara mekanik terhubung dengan kruk as dan bergerak secara konstan. Gas kerja bergerak melewati pendingin (*cooler*), regenerator dan pemanas (*heater*), bergerak maju dan mundur diantara dua silinder. Masing-masing piston memiliki segel (*seals*) untuk menjaga agar gas kerja tetap di dalam silinder. Seluruh mesin *Stirling* tipe alpha merupakan mesin kinematik.



Gambar 2.5. Mesin Stirling tipe alpha

2. Tipe gamma (γ)

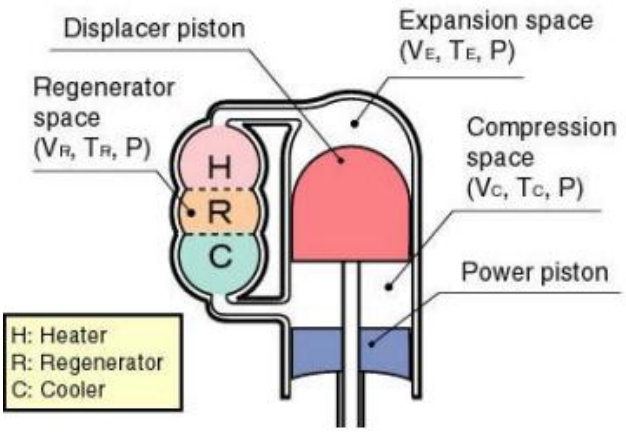


Gambar 2.6. Mesin Stirling tipe gamma

Mesin Stirling tipe gamma (gambar 2.6.) memiliki susunan dimana *displacer* dan power piston terletak di silinder yang terpisah. *Displacer* menggerakkan gas kerja keluar dan masuk bagian panas dan dingin pada bagian mesin. Ruang bagian ujung dingin (*cold end*) termasuk bagian dingin dari *displacer* sama seperti *power piston*. Gas kerja bergerak melewati pendingin (*cooler*), regenerator dan pemanas

(*heater*), bergerak maju dan mundur diantara dua silinder. Mesin *Stirling* tipe gamma dapat dikategorikan sebagai mesin kinematik ataupun mesin *free-piston*.

3. Tipe beta (β)



Gambar 2.7. Mesin Stirling tipe beta

Mesin Stirling tipe beta (gambar 2.7) memiliki susunan dimana *displacer* dan power piston selaras dengan satu dan yang lain. *Displacer* menggerakkan gas kerja keluar dan masuk bagian panas dan dingin pada bagian mesin. Bagian ujung panas adalah ruang ekspansi (*expansion space*) dan bagian ujung dingin adalah ruang kompresi (*compression space*). Gas bergerak keluar masuk melewati pendingin (*cooler*), regenerator dan pemanas (*heater*). Mesin *Stirling* tipe beta dapat dikategorikan sebagai mesin kinematik ataupun mesin *free-piston*.

2.5. Teori Schmidt

Dalam proses pembuatan sebuah prototipe mesin Stirling, dibutuhkan proses perancangan. Proses perancangan tersebut meliputi proses perhitungan

termodinamika, salah satu teori yang sering dipergunakan sebagai pendekatan model termodinamika mesin Stirling adalah teori Schmidt yang pertama kali diperkenalkan oleh Gustav Schmidt pada 1871.

Banyak pengembangan mengenai teori Schmidt, diantaranya pengembangan yang dilakukan oleh Koichi Hirata. Teori Schmidt yang digunakan dalam penelitian ini merupakan teori Schmidt yang dipublikasikan oleh Koichi Hirata, seorang ilmuwan asal Jepang. Teori Schmidt adalah salah satu metode perhitungan isotermal untuk mesin Stirling. Teori ini merupakan teori yang paling sederhana dan sangat berguna untuk pengembangan mesin Stirling. Teori ini berdasarkan pada ekspansi isotermal dan kompresi dari gas ideal.

2.5.1. Asumsi-asumsi Teori Schmidt

Performas mesin dapat dikalkulasi dari diagram P-V. Volume mesin juga dapat dengan mudah dihitung dari geometri internalnya. Jika volume massa dari fluida kerja sudah dapat ditentukan, maka tekanan dapat dihitung menggunakan metode gas ideal (Graham, 1980).

Parameter-perameter motor Stirling dapat dihitung dengan menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut:

a) Tidak ada *pressure loss* dan tidak ada perbedaan *internal pressure*.

b) Proses ekspansi dan proses kompresi berlangsung secara iso*thermal*.

c) Kondisi fluida kerja adalah udara sebagai gas ideal.

d) Terjadi regenerasi sempurna.

e) Volume sisa pada silinder panas menjaga temperatur gas pada silinder panas - T_E, volume sisa pada silinder dingin menjaga temperatur gas pada silinder dingin - T_C selama siklus.

f) Temperatur pada regenerator adalah rata-rata ekspansi - T_E dan temperatur kompresi - T_C .

g) Volume ekspansi (V_E) dan volume kompresi (V_C) berubah berdasarkan fungsi sinusioda.

2.5.2. Persamaan-Persamaan Perancangan Mesin Stirling Tipe Beta (β) Menurut Teori Schmidt.

Untuk menggunakan Teori Schmidt dimulai dengan menghitung volume dari silinder ekpansi dan silinder kompresi pada sudut engkol tertentu. Volume momental dideskripsikan dengan sudut engkol–x. Sudut engkol didefinisikan sebagai x=0 ketika piston ekspansi (piston pada silinder panas) berada pada posisi TMA. Sudut phasa –dx yaitu sudut antara piston *displacer* dan piston daya.

Volume ekspansi sesaat - V_E dinyatakan pada persamaan (7) dengan asumsi yang dijelaskan sebelumnya pada point (g).

$$V_E = \frac{V_{SE}}{2}\,(1 - \cos x) + V_{DE} \quad \text{.....} (7)$$

Dimana :

V_E = Volume ekspansi sesaat (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

x = sudut engkol

V_{DE} = Volume titik mati ruang ekspansi (m³)

Volume kompresi sesaat - V_C dapat dihitung dengan persamaan (8) dan sudut fase –dx.

$$V_C = \frac{V_{SE}}{2}(1-\cos x) + \frac{V_{SC}}{2}\{1-\cos(x-dx)\} + V_{DC} - V_B \quad \text{.....(8)}$$

Dimana :

V_C = Volume kompresi sesaat (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

x = sudut engkol

V_{SC} = Volume sapuan piston kompresi atau piston daya (m³)

dx = sudut fase

V_{DC} = Volume titik mati ruang kompresi (m³)

Pada pembahasan untuk mesin Stirling type beta (β), piston *displacer* dan piston daya berada dalam silinder yang sama. Ketika kedua piston melakukan gerak tumpang tinding (*overlap stroke*), terciptalah ruang kerja efektif. Volume tumpang tindih (*Overlap Volume*) V_B dapat dihitung menggunakan persamaan (9) sebagai berikut :

$$V_B = \frac{V_{SE}+V_{SC}}{2} - \sqrt{\frac{{V_{SE}}^2+{V_{SC}}^2}{4} - \frac{V_{SE}V_{SC}}{2}\cos dx} \quad \text{.....(9)}$$

Volume total sesaat dihitung dengan menggunakan persamaan (10).

$$V = V_E + V_C + V_R \quad \text{.....(10)}$$

Dimana :

V = Volume total

V_E = Volume ekspansi sesaat (m^3)

V_C = Volume kompresi sesaat (m^3)

V_R = Volume regenerator (m^3)

Tekanan mesin – P didasarkan pada tekanan rata-rata - P_{mean}, tekanan minimum - P_{min} dan tekanan maximum- P_{max} , sebagai berikut :

$$P = \frac{P_{mean}\sqrt{1-c^2}}{1-c\,.\cos(x-a)} = \frac{P_{min}\,(1+c)}{1-c\,.\cos(x-a)} = \frac{P_{max}\,(1-c)}{1-c\,.\cos(x-a)} \quad \text{.....(11)}$$

Dimana :

P = Tekanan mesin Stirling (Pa)

P_{mean} = Tekanan rata-rata mesin Stirling (Pa)

P_{min} = Tekanan minimum mesin Stirling (Pa)

P_{max} = Tekanan maksimum mesin Stirling (Pa)

Dimana untuk menghitung nilai c dan a, serta rasio temperatur – t, rasio volume langkah – v dan rasio volume sisa dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini.

Rasio temperatur dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{T_C}{T_E} \qquad \text{.....(12)}$$

Dimana :

t = Rasio temperatur

T_C = Temperatur gas ruang kompresi (K)

T_E = Temperatur gas ruang ekspansi (K)

Rasio volume langkah dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \qquad \text{.....(13)}$$

Dimana :

v = Rasio volume langkah

V_{SC} = Volume sapuan piston kompresi atau piston daya (m^3)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m^3)

Dan rasio-rasio volume yang dibutuhkan dalam perhitungan dapat dicari menggunakan rumus dibawah ini :

Rasio volume *overlap* X_B dapat dihitung menggunakan persamaan (14), adapaun rumusnya dalah sebagai berikut :

$$X_B = \frac{V_B}{V_{SE}} \qquad \text{.....(14)}$$

Dimana :

X_B = Rasio volume *overlap* (m³)

V_B = Volume *overlap* (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

Rasio volume titik mati silinder panas/ekspansi X_{DE} dapat dihitung menggunakan persamaan (15), adapaun rumusnya dalah sebagai berikut :

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad \text{.....(15)}$$

Dimana :

X_{DE} = Rasio volume titik mati ruang ekspansi atau *displacer* (m³)

V_{DE} = Volume titik mati ruang ekspansi (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

Rasio volume titik mati silinder dingin/kompresi X_{DC} dapat dihitung menggunakan persamaan (16), adapaun rumusnya dalah sebagai berikut :

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad \text{.....(16)}$$

Dimana :

X_{DC} = Rasio volume titik mati ruang kompresi (m³)

V_{DC} = Volume titik mati ruang kompresi (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

Rasio volume regenerator X_R dapat dihitung menggunakan persamaan (17), adapaun rumusnya adalah sebagai berikut :

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad \text{.....(17)}$$

Dimana :

X_R = Rasio volume titik mati ruang regenerator (m³)

V_R = Volume ruang regenerator (m³)

V_{SE} = Volume sapuan piston ekspansi atau *displacer* (m³)

Untuk koefisien-koefisien yang dibutuhkan dalam perhitungan dapat menggunakan rumus dibawah ini:

Untuk koefisien a dapat menggunakan rumus :

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1} \quad \text{.....(18)}$$

Untuk koefisien S dapat menggunakan rumus :

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tX_R}{1-t} + v + 2X_{DC} + 1 - 2X_B \quad \text{.....(19)}$$

Untuk koefisien B dapat menggunakan rumus :

$$B = \sqrt{t^2 + 2\,(t-1)\,v \cos dx + v^2 - 2t + 1} \quad \text{.....(20)}$$

Untuk koefisien c dapat menggunakan rumus :

$$c = \frac{B}{S} \quad \text{.....(21)}$$

Diagram P-v dari mesin Stirling tipe beta dapat dibuat dari hasil perhitungan persamaan-persamaan di atas sehingga didapat nilai tekanan (P) dan Volume total momental (V) pada masing-masing posisi sudut x, dimulai dari sudut x =0° sampai dengan sudut x = 360° untuk mendapatkan nilai satu siklus penuh.

2.5.3. Energi, Daya dan Efisiensi Indikator

Energi indikator (area didalam diagram P – V) pada ruang ekspansi dan kompresi dapat dihitung sebagai solusi analitis menggunakan koefisien-koenfisien di atas. Energi indikator pada ruang ekspansi (energi ekspansi indikator) - W_E (Joule), berdasarkan tekanan rata-rata - P_{mean} dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$W_E = \oint P\, dV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c . \sin a}{1+\sqrt{1-c^2}} \quad \text{.....(22)}$$

Energi indikator pada ruang kompresi (energi kompresi indikator) - W_C (Joule), berdasarkan tekanan rata-rata - P_{mean} dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$W_C = \oint P\, dV_C = -\frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t . \sin a}{1+\sqrt{1-c^2}} \quad \text{.....(23)}$$

Energi indikator selama satu siklus pada mesin - W_i (Joule), berdasarkan tekanan rata-rata - P_{mean} dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$W_i = W_e + W_c = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c (1-t) . \sin a}{1+\sqrt{1-c^2}} \quad \text{.....(24)}$$

Daya indikator dari mesin - L_i (Watt) dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini menggunakan kecepatan mesin per satuan detik , n(rps/Hz).

$$L_i = W_i n \quad \text{.....} (25)$$

Energi ekspansi indikator- W_E mengindikasikan bahwa adanya panas yang masuk dari sumber panas ke dalam mesin. Sedangkan Energi kompresi indikator- W_C mengindikasikan adanya panas yang terbuang dari mesin ke udara atau lingkungan sekitar. Maka efesiensi *thermal* pada mesin – e dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini :

$$e = \frac{W_i}{W_E} = 1 - t \quad \text{.....} (26)$$

2.6. Keseimbangan Energi Siklus Mesin Stirling.

Keseimbangan energi dari siklus mesin Stirling dapat dilihat melalui diagram indikator atau kecenderungan tekanan di dalam mesin Striling yang dihitung. Hasil dari keseimbangan energi adalah energi masuk, panas yang diregenerasikan dan kerja internal dari siklus serta efisiensi panas internal.

Di dalam mesin Stirling, panas dirubah menjadi kerja. Untuk perubahan ini berlaku hukum untuk siklus panas, yaitu panas yang dirubah menjadi kerja hanyalah sebagian sedangkan sebagian lain terbuang dari mesin. Untuk masuk dan keluarnya panas dari atau keluarnya dari mesin diantara gas kerja dan perpindahan panas pada permukaan biasa disebut dengan gradient temperatur. Gradient temperatur ini bervariasi pada saat siklus berlangsung, dikarenakan temperatur gas

kerja yang juga berubah-ubah. Oleh karena itu di dalam semua bagian dalam mesin, panas dimasukkan dan dikeluarkan dari atau keluar gas kerja selama satu siklus. Ini membutktikan (dari prinsip mesin Stirling) bahwa keseimbangan panas selama satu siklus pada sisi panas yaitu positif (panas masuk ke dalam gas kerja) dan keseimbangan panas selama satu siklus pada sisi dingin yaitu negatif (panas keluar dari gas kerja), keseimbangan panas pada regenerator dalam satu siklus haruslah netral.

2.6.1. Entropi Gas Kerja

Persamaan untuk perubahan spesifik entropi dari gas kerja dapat diturunkan dari hukum I termodinamika untuk sistem tertutup (ŠKORPÍK, 2012) :

$$s_x - s_0 = c_v . \ln \frac{p_x V_x}{p_0 V_0} + r . \ln \frac{V_x}{V_0} \quad \text{.....} (27)$$

Dimana =

0 = Subscrip 0 menunjukkan titik awal siklus

x = Subscrip x menunjukkan setiap titik siklus

c_v = Panas spesifik pada volume konstan (J/kg.K)

r = Konstanta gas pada gas kerja (J/kg.K)

s = Entropi spesifik (J/kg.K)

Persamaan di atas adalah persamaan perubahan entropi spesifik gas kerja yang berhubungan dengan awal siklus. Melalui persamaan tersebut dapat dibangun

diagram siklus T - s. Dari diagram siklus T-s dapat dilakukan identifikasi kerugian yang terdapat di dalam siklus. Namun dalam prakteknya, yang dapat diukur dengan sempurna hanya tekanan gas kerja sebagai fungsi sudut rotasi. Jumlah tepat dari gas kerja yang terdapat di dalam mesin dan nilai tepat dari temperatur rata-rata gas kerja tidak mungkin untuk diukur. Maka dari itu dibuatlah digram Θ-s, dimana Θ adalah rasio antara temperatur rata-rata gas kerja didalam mesin dengan temperatur maksimum gas kerja didalam mesin. Untuk menghitung nilai rasio temperatur- Θ dapat menggunakan persamaan (23) sebagai berikut :

$$\Theta = \frac{T_x}{T_{x,max}} = \frac{P_x V_x}{(P_x V_x)_{max}} \quad \text{.....} (28)$$

Dimana :

Θ = rasio antara temperatur rata-rata gas kerja didalam mesin dengan temperatur maksimum gas kerja didalam mesin.

T_x = Temperatur pada rotasi sudut x.

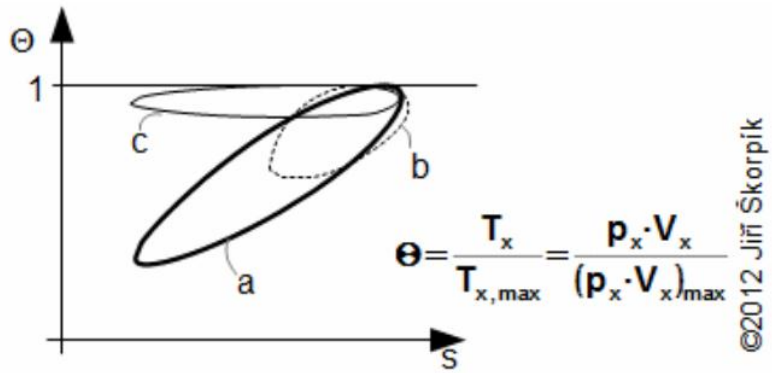
$T_{x,max}$ = Temperatur pada rotasi sudut x yang paling maksimal dalam satu siklus.

P_x = Tekanan pada rotasi sudut x.

V_x = Volume total sesaat/momental pada rotasi sudut x.

$(P_x V_x)_{max}$ = Tekanan dan volume total sesaat/momental pada rotasi sudut x yang paling maksimal dalam satu siklus.

Diagram Θ-s dapat menunjukkan kerugian / *losses* dan kekurangan dari mesin.



Gambar 2.8. Diagram Θ-s untuk siklus mesin Stirling

Dari gambar di atas menunjukkan berbagai macam tipe diagram Θ-s yang dihasilkan dari perhitungan. Diagram Θ-s tipe a adalah diagram tipe ideal, sedangkan diagram Θ-s tipe b adalah diagram mesin dengan regenerator berkapasitas kecil, diagram Θ-s tipe c adalah diagram mesin dengan kebocoran pada ring piston (ŠKORPÍK, 2012).

2.6.2. Perubahan Kenaikan Prinsip Entropi (*Incrase of Entropy Principle*)

Entropi dapat diciptakan dan dihasilkan selama proses *irreversible*, dan penciptaan ini seutuhnya dikarenakan keadaan dari kemampuan *irreversible*. Entropi yang tercipta dalam proses ini disebut dengan *entropy generation* dan ditunjukkan dengan simbol S_{gen}. Perlu dicatat bahwa nilai dari *entropy generation* S_{gen} selalu bernilai positif atau nol. Dan juga dalam ketiadaan dari setiap perpindahan entropi, perubahan entropi dari sebuah sistem bernilai sama dengan *entropy generation*.

Perubahan kenaikan dari prinsip entropi dimana entropi pada keadaan sistem tertutup selama proses akan selalu meningkat atau dalam kasus tertertu dari proses *reversible* akan bertahan konstan. Perubahan kenaikan dari prinsip entropi tidak

menutup kemungkinan bahwa entropi dalam sistem tidak dapat menurun. Perubahan entropi dalam sistem dapat bernilai negatif selama proses, tetapi *entropi generation* tidak dapat. Kenaikan dari prinsip entropi dapat disimpulkan sebagai berikut :

$$S_{gen} \begin{cases} > 0 \; Proses \; Irreversibel \\ = 0 \; Proses \; Reversibel \\ < 0 \; Proses \; Imposibel \end{cases}$$

Hubungan di atas menunjukkan kriteria untuk menentukan apakah prosesnya *reversible, irreversible* atau *impossible* (Cengel & Boles, 2006).

2.7. Kolektor Surya

Kolektor surya adalah sebuah alat penukar kalor khusus yang mengubah energi radiasi matahari menjadi panas. Sebuah kolektor surya berbeda dengan beberapa perlengkapan penukar kalor konvensional yang lain. Yang biasanya merubah sifat fluida-ke fluida dengan menfaatkan laju perpindahan panas dan radiasi dianggap sebagai faktor yang sering diabaikan. Pada kolektor surya, perpindahan panas terjadi antara sumber energi cahaya ke fluida (F Kreith, J.F Kreider, 1973).

Pada dasarnya ada dua jenis kolektor surya: *stasioner* atau tidak terkonsentrasi dan yang terkonsentrasi. *Stationer* kolektor memiliki perbandingan daerah yang sama untuk menangkap dan untuk menyerap radiasi matahari , sedangkan *sun-tracking* kolektor surya yang terkonsentrasi biasanya memiliki permukaan cekung untuk menangkap dan memfokuskan radiasi sinar matahari ke daerah penerima

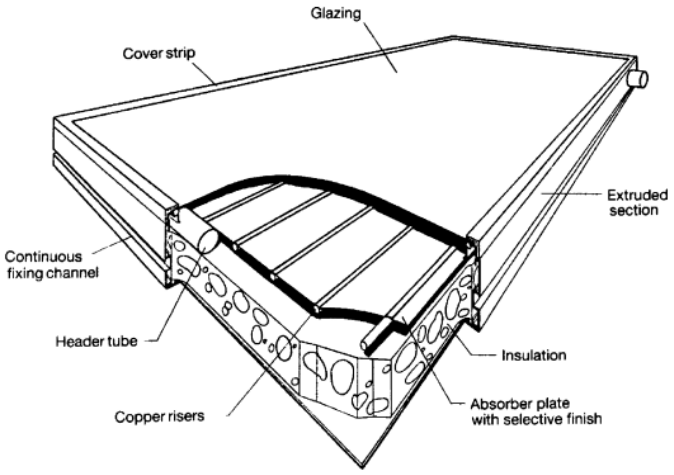
yang lebih kecil, sehingga meningkatkan *fluks* radiasi. Berikut ini daftar data lengkap jenis-jenis kolektor surya (Kalogirou, 2004):

Tabel 2.1**.** Kolektor Energi surya (Kalogirou, 2004)

Motion	Collector type	Absorber type	Concentration ratio	Indicative temperature range (°C)
Stationary	Flat plate collector (FPC)	Flat	1	30-80
	Evacuated tube collector (ETC)	Flat	1	50-200
	Compound parabolic collector (CPC)	Turbular	1-5	60-240
Single-axis tracking			5-15	60-300
	Linear Fresnel reflector (LFR)	Turbular	10-40	60-250
	Parabolic trough collector (PTC)	Turbular	15-45	60-300
	Cylindrical trough collector (CTC)	Turbular	10-50	60-300
Two-axes tracking	Parabolic dish reflector (PDR)	Point	100-1000	100-500
	Holiotat field collector (HFC)	Point	100-1500	150-2000

Catatan: Rasio konsentrasi didefinisikan sebagai daerah penerima dibagi dengan luas *receiver*/penyerap dari kolektor.

2.7.1. Kolektor surya *stationer* / tidak terkonsentrasi.



Gambar 2.9. Gambaran penampang kolektor plat datar.

Pada dasarnya, kolektor surya dibedakan menurut pergerakannya, yaitu diam/*stationery*, pelacak satu *axis* dan pelacak 2 *axis*. Untuk kolektor surya jenis

stationer posisinya ditanam dan tetap pada satu tempat serta tidak melacak pergerakan matahari. Tiga jenis kolektor yang termasuk dalam kategori jenis ini, yaitu : Kolektor plat datar/ *Flat plate collectors* (FPC), *stationary compound parabolic collectors* (CPC), dan *evacuated tube collectors* (ETC).

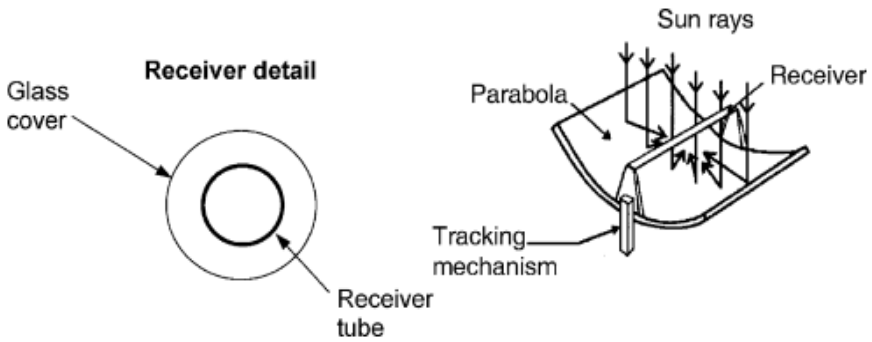
2.7.2. Kolektor surya terkonsentrasi dengan pelacak matarahari / *Sun tracking concentrating collectors.*

Dalam kolektor terkonsentrasi, energi surya secara optik dikonsentrasikan sebelum dirubah menjadi energi panas. Konsentrasi dapat diperoleh dengan merefleksikan atau membiaskan radiasi surya dengan menggunakan cermin atau lensa. Refleksi atau pembiasan cahaya dikonsentrasikan pada zona fokus, sehingga meningkatkan fluks energi pada target penerima/*receiver*. Kolektor terkonsentrasi juga dapat diklasifikasikan menjadi *non*-penrcitraan (*non-imaging*) dan pencitraan (*imaging*) tergantung dari citra matahari terfokus pada penerima/*receiver* atau tidak. Konsentrator CPC (*Stationary compound parabolic collectors*) termasuk dalam kategori pertama, sedangkan yang lainnya termasuk dalam konsentrator yang memiliki pencitraan/*imaging*.

Kolektor surya terkonsentrasi dengan pelacak dilengkapi dengan *tracking system*/sistem pelacak yang memungkinkan konsentrator selalu menghadap tegak lurus ke arah matahari serta selalu melacak pergerakan matahari. Jenis kolektor yang termasuk dalam kategori ini yaitu :

1. Kolektor menggunakan parabola/*Parabolic trough collector* (PTCs)

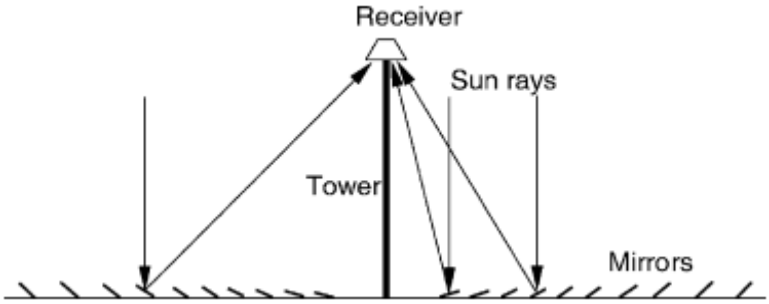
PTCs dibuat dengan menekuk lembar bahan reflektif menjadi bentuk parabola. Tabung hitam yang berperan sebagai *receiver*/penerima terbuat dari bahan logam ditutupi dengan tabung kaca untuk mengurangi kerugian panas dan ditempatkan di sepanjang garis fokus penerima (gambar 2.10). Ketika parabola mengarah tegak lurus kearah matahari, sinar matahari yang sejajar dengan *reflector* akan terpantulkan ke tabung *receiver*. Kolektor dapat dibuat sepanjang arah timur-barat, sehingga dapat melacak matahari dari arah utara-selatan, atapun sebaliknya.



Gambar 2.10. Skema kolektor menggunakan parabola

2. *Linear Fresnel reflector* (LFR)

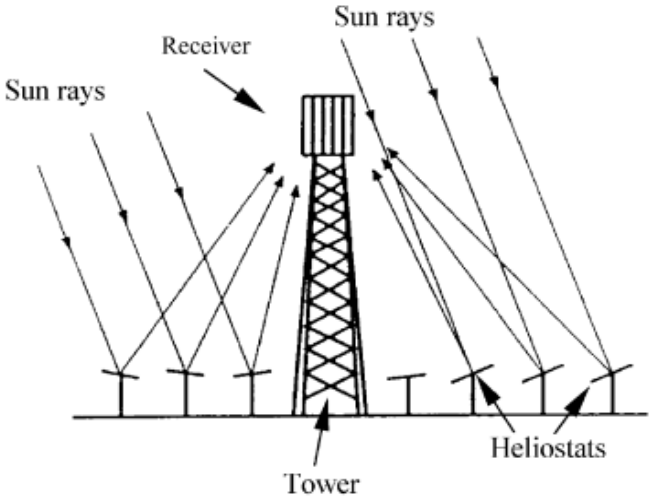
Teknologi LFR terdiri dari susunan bidang cermin linier yang ditambatkan ke permukaan tanah, berfungsi mengkonsentrasikan cahaya kearah *receiver* yang terpasang pada bagian atas tower. Cermin reflektor yang tertambat ke permukaan tanah dapat meminimalisir penambahan struktur. Teknologi ini membutuhkan lahan yang luas agar mendapatkan pasokan listrik yang mencapai skala MW.



Gambar 2.11. Diagram skema LFR

3. Kolektor Heliostat.

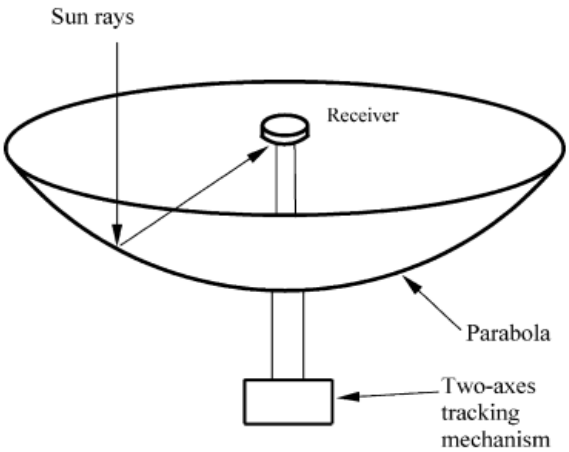
Untuk mendapatkan energi radiasi dengan input yang tinggi, penggunaan beberapa cermin datar atau beberapa heliostat yang dilengkapi dengan rangka bangun altazimuth dapat digunakan untuk memantulkan radiasi sinar matahari langsung ke arah target seperti yang terlihat pada gambar 2.12. Teknologi ini dapat disebut sebagai pembangkit *heliostat* atau penerima pusat (*central receiver*). Beberapa kolektor *heliostat* yang dilengkapi dengan sistem *tracking* mengkonsentrasikan sinar matahari ke arah *receiver* yang dapat menyerap sinar matahari terkonsentrasi lalu mentransferkan energi tersebut ke fluida pemindah panas. Sistem transportasi panas mengarahkan fluida pemindah panas dalam proses tertutup (*closed loop*) antara *receiver*, penampung (*storage*) dan sistem pengubah daya.



Gambar 2.12. Skema sistem pembangkit heliostat

4. Piringan Parabola/*Parabolic dish*

Reflektor piringan parabola skema nya terlihat pada gambar 2.13, adalah kolektor dengan satu titik fokus yang dapat melacak pergerakan matahari secara dua arah sehingga dapat mengkonsentrasikan energi matahari pada *receiver* yang terletak pada titik fokus piringan/*dish*. Sturktur piringan harus dapat melacak secara penuh pergerakan matahari agar dapat merefleksikan sinar matahari ke arah *receiver*.



Gambar 2.13. Skema sistem piringan parabola (*parabolic dish*)

Receiver menyerap energi radiasi matahari lalu mengubahnya kebentuk energi panas didalam fluida yang berpindah. Energi panas dapat diubah langsung ke bentuk listrik dengan menggunakan generator mesin yang dikopel langsung ke *receiver* atau energi listrik tersebut dapat dipindahkan melalui pipa ke pusat sistem pengubah daya. Sistem piringan parabola dapat mencapai temperatur melebihi 1500°C. Keunggulan dari piringan parabola yaitu :

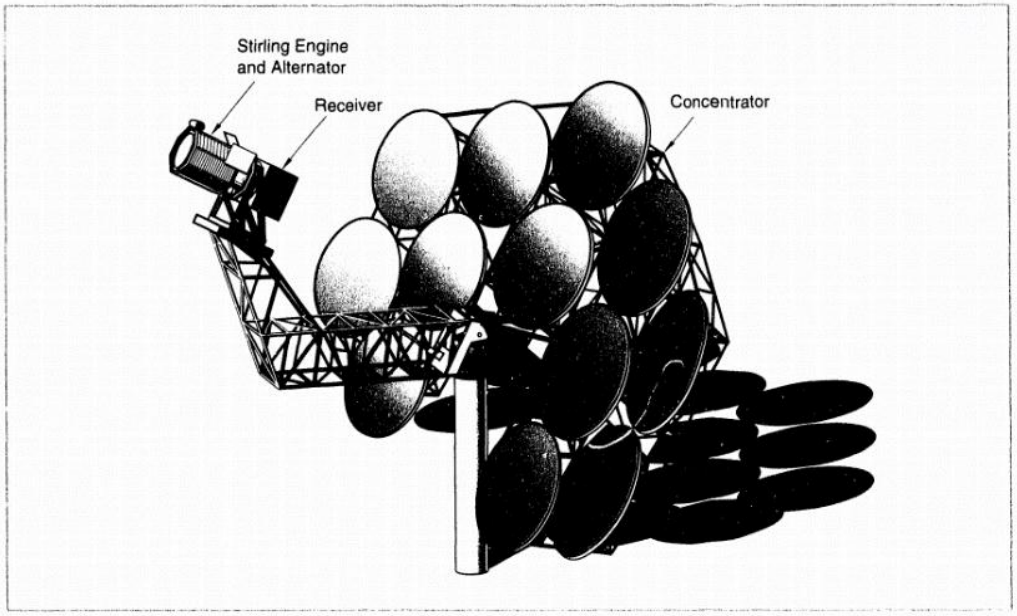
1. Dikarenakan pergerakannya yang selalu mengikuti arah matahari, piringan parabola merupakan sistem kolektor yang paling efisien.
2. Mempunyai rasio konsentrasi berkisar 600-2000, hal ini merupakan efisien tertinggi pada penyerapan energi panas dan sistem pengubah daya.
3. Mempunyai modul kolektor dan unit *receiver* yang dapat berfungsi secara mandiri atau dapat berfungsi sebagai bagian dari sistem yang lebih besar lagi dari piringan.

Salah satu bentuk penerapan dari sistem piringan parabola yaitu *Concentrator Solar Parabolic* atau CSP. Pada dasarnya, sistem CSP terutama pembangkit listrik tenaga surya dengan *dish*/*Stirling* terdiri dari 3 bagian utama yaitu kolektor/pengkonsetrasi sinar matahari berbentuk parabola cekung (atau pitingan), *reciver* dan *stirling engine* dengan generator listrik atau alternator seperti pada gambar 2.14. Peran dari masing-masing komponen adalah sebagai berikut:

1. Sistem *tracking*/pelacak matahari mengerakkan kolektor secara dua arah untuk menjaga agar sumbu optik nya mengarah tepat ke matahari. Bentuk dari konsentratornya memunginkan agar konsetrator dapat memantulkan sinar matahari mengarah tepat ke permukaan *receiver*.

2. *Receiver* menyerap energi surya yang terkonsentrasi. Kemudian energi panas memanaskan gas/fluida yang bekerja di dalam *stirling engine*.

3. *Stirling engine* terdiri dari sistem tertutup yang diisi dengan gas kerja (biasanya hydrogen atau helium) yang bergantian dipanaskan dan didinginkan. Disebut gas kerja karena gas tersebut terus menerus bekerja di dalam mesin dan tidak terkonsumsi. Mesin bekerja dengan mengkompresikan gas kerja ketika dingin, dan berekspansi saat panas. Semakin banyak daya yang dihasilkan dengan meng-ekspansi gas panas dari yang diperlukan untuk meng-kompresi gas dingin. Tindakan ini menghasilkan gerakan naik dan turun nya tekanan pada piston mesin, gerakan tersebut dirubah menjadi tenaga maknik. Beberapa mesin *stirling* menggunakan generator listrik atau alternator terpisah untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik, sementara ada beberapa yang memadukan alternator ke dalam mesin. Mesin/alternator dengan mesin pendukung biasa disebut converter atau unit konversi daya.

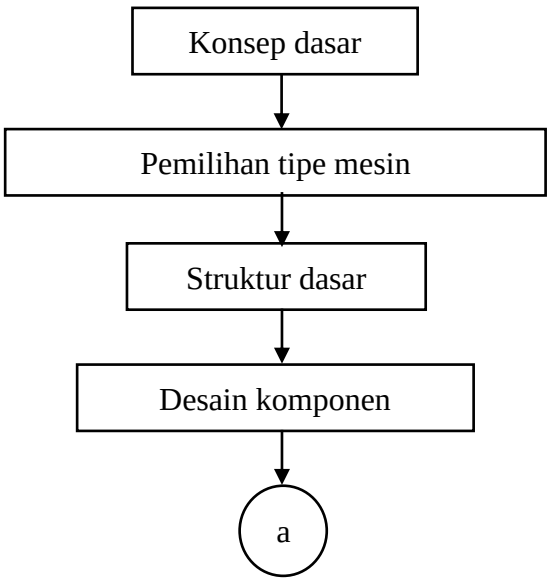


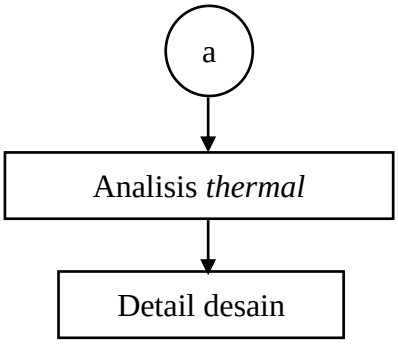
Gambar 2.14. Konsep tentang mesin dish/Stirling menampilkan 3 komponen utama yaitu Konsentrator, receiver, dan mesin stirling/ alternator (William B. Stine, 1994)

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metodologi Penelitian

Dalam penelitian ini dilakukan analisis perancangan desain mesin Stirling tipe beta. Proses perancangan diawali dengan penentuan konsep dasar untuk desain rancangan yang terdiri dari pengaplikasian alat, efisiensi dan ukuran. Selanjutnya pemilihan tipe dari mesin Stirling yang akan dibuat berdasarkan posisi silinder, struktur *heat exchangers* dan mekanisme *crank shaft*/ kruk as. Setelah kedua hal tersebut telah ditentukan dilanjutkan dengan membuat sturktur dasar dari prototipe dan membuat desain komponen dari *heat exchanger* serta mekanisme *crank shaft*. Dilanjutkan dengan melakukan analisis *thermal* menggunakan teori Schmidt lalu membuat detail dari desain prototipe. *Flowchart* dari desain mesin adalah sebagai berikut :





Gambar 3.15. *Flowchart* desain mesin Stirling

Penjelasan mengenai metodologi penelitian yang digunakan lebih rinci adalah sebagai berikut :

3.1.1. Konsep Dasar

Dalam penelitian ini target dari pembuatan desain mesin Stirling yaitu mesin berbentuk skala lab, ringan dengan struktur yang tidak kompleks sehingga mudah dalam pembuatannya dan biaya yang dibutuhkan sedikit/murah. Spesifikasi mesin yang dibuat yaitu dapat dilihat pada tabel 3.3. sebagai berikut :

Tabel 3.2. Target Rancangan Mesin Stirling

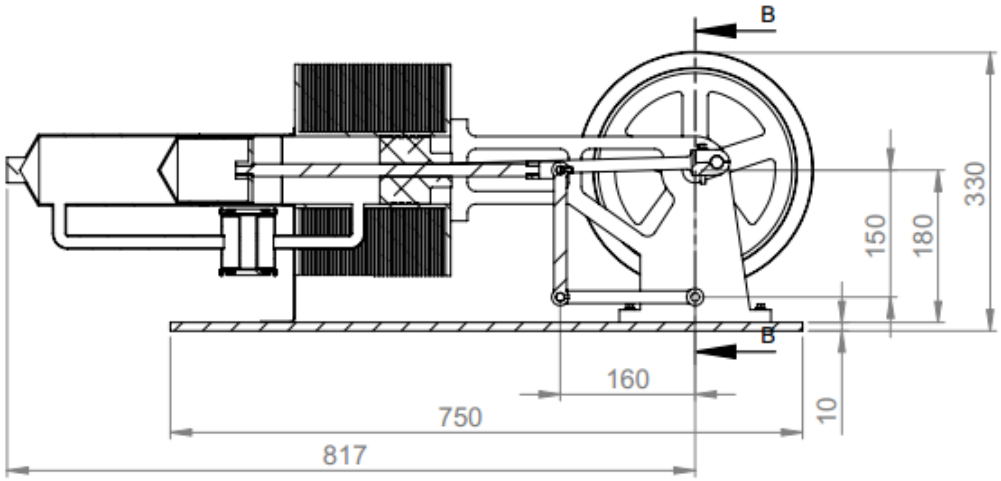
No	Data	Nilai
1	Gas Kerja	Udara
2	Tekanan Maksimum	101,32 Pa
3	Temp. Silinder panas Maksimum	300-350° C
4	Temp. Silinder dingin	20-40° C
5	Nilai kecepatan mesin	400-500 rpm

Udara digunakan sebagai gas kerja, walaupun untuk mendapatkan performa yang lebih tinggi lagi dapat menggunakan helium atau nitrogen namun kedua bahan tersebut mahal dan susah dalam penanganannya.

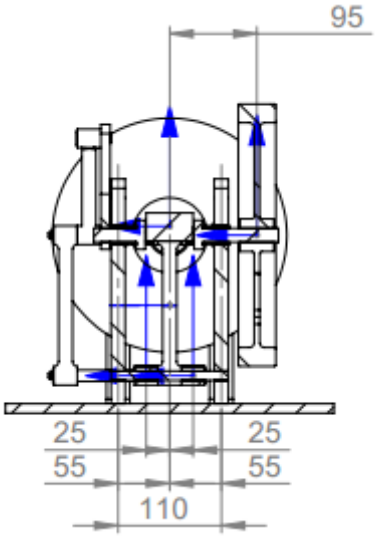
Tekanan maksimum mesin yaitu 101,32 Pa, hal ini dikarenakan kemampuan portabel dari mesin yang ingin dibuat dan pembuatannya dalam sekala lab. Temperatur maksimum pada silinder panas yaitu 300° C.

3.1.2. Struktur Dasar

Gambar 3.16. menunjukan desain gambar yang telah jadi, desain tersebut merupakan hasil setelah mempertimbangkan tipe mesin, posisi piston dan jenis *heat exchangers* pada bagian konsep dasar sebelumnya. Piston *displacer* dan piston daya berada pada satu garis/ *line* seperti mesin Stirling tipe beta- β dimana mesin tipe ini lebih mudah dan ringan dibandingkan dengan mesin Stirling tipe gama ataupun alpha. *Heat exchangers*/penukar kalor yang digunakan yaitu tipe sirip dan menggunakan *regenerator*. Dengan data yang telah ada maka dapat dicari nilai dari daya indikator yang dihasilkan rancangan mesin Stirling menggunakan konsep termodinamika atau analisis *thermal*.



Gambar 3.16. Tampak samping struktur dasar rancangan mesin Striling yang dibuat (satuan dalam mm).

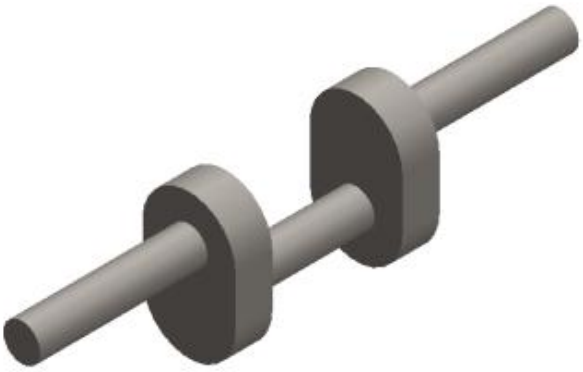


Gambar 3.17. Tampak belakang struktur dasar rancangan mesin Striling yang dibuat (satuan dalam mm)

3.1.3. Desain Komponen

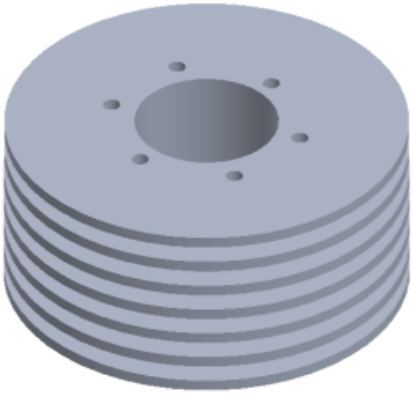
Setelah menentukan konsep dasar dan struktur dasar dari mesin Stirling yang dibuat, selanjutnya dibuatlah desain komponen. Desain komponen ini terdiri dari pembutan desain penukar panas, mekanisme kruk as dan alat penyegel. Desain

komponen penukar panas yang dibuat adalah regenerator dan penambahan sirip pada bagian silinder dingin. Pembuatan rancangan mekanisme kruk as menghasilkan dimensi untuk langkah pada piston *displacer* dan pistorn daya. Desain kruk as, yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.18. sebagai berikut :



Gambar 3.18. Mekanisme kruk as yang digunakan.

Rancangan alat penukar panas yang digunakan dapat dilihat pada gambar 3.19. dan gambar 3.20 sebagai berikut:



Gambar 3.19. Sirip sebagai alat penukar panas.

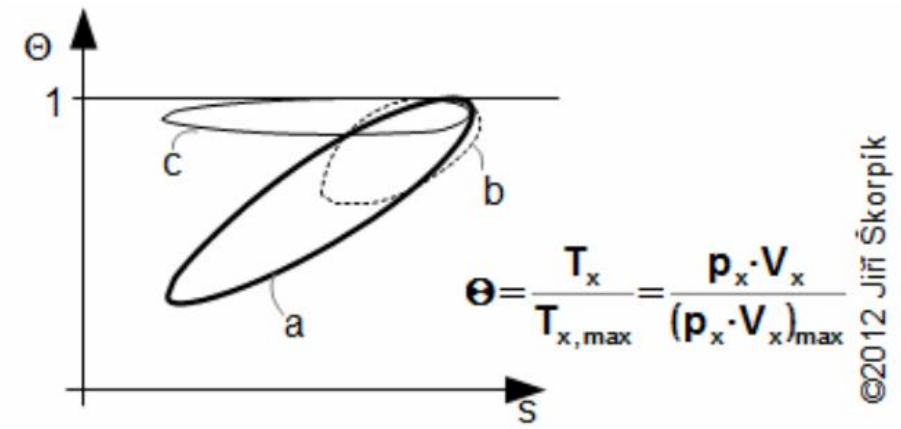
Gambar 3.20. Regenerator

3.1.4. Analisis *Thermal*

Dimensi dari hasil rancangan yang dibuat digunakan sebagai acuan dalam melakukan analisis *thermal*. Analisis *thermal* mesin Stirling dapat dihitung menggunakan Teori Schmidt yang berdasarkan hukum I termodinamika dan gas ideal hasil publikasi Koichi Hirata. Hasil analisis *thermal* hukum termodinamika I menggunakan Teori Schmidt yaitu volume momentum total dalam mesin (V) dan tekanan dalam mesin (P) selama satu siklus penuh. Dari hasil perhitungan, dibuatlah diagram P – V dimana area di dalam diagram dapat menggambarkan kerja sehingga digunakan untuk menghitung nilai energi indikator (W_i), daya indikator (L_i) dan efisiensi (η) dari hasil desain rancangan.

Untuk pembuktian hukum termodinamika II digunakan perhitungan nilai entropi hasil rancangan berdasarakan hasil perhitungan analisis hukum termodinamika I. Hasil dari analisis menggunakan hukum termodinamika II yaitu perubahan nilai total entropi ($\boldsymbol{s_x - s_0}$) dan ratio temperatur ($\boldsymbol{\Theta}$) selama satu siklus penuh. Hasil perhitungan ditampilkan dalam bentuk tabel, tabel hasil perhitungan digunakan sebagai bahan dasar pembuatan diagram T-S /$\boldsymbol{\Theta - (s_x - s_0)}$ dimana area di

dalam diagram dapat menunjukkan proses perpindahan panas yang terjadi didalam mesin. Berdasarkan penelitian yang dipublikasikan oleh Jiří ŠKORPÍK pada tahun 2012, didapat beragam bentuk diagram Θ – s hasil dari perhitungan menggunakan analisis *thermal* hukum termodinamika II yang dapat dilihat dalam gambar berikut ini :



Gambar 3.21. Diagram Θ – s Siklus Mesin Stirling (ŠKORPÍK, 2012)

Dari gambar di atas menunjukkan berbagai macam tipe diagram Θ-s yang dihasilkan dari perhitungan. Diagram Θ-s tipe a adalah diagram tipe ideal, sedangkan diagram Θ-s tipe b adalah diagram mesin dengan regenerator berkapasitas kecil, diagram Θ-s tipe c adalah diagram mesin dengan kebocoran pada ring piston (ŠKORPÍK, 2012).

Nilai total dari perubahan entropi yang terjadi di dalam mesin dapat menentukan apakah rancangan yang dibuat sudah memenuhi syarat hukum termodinamika II dengan hubungan prinsip kenaikan entropi sebagai berikut (Cengel & Boles, 2006) :

$$S_{gen} \begin{cases} > 0 \; Proses \; Irreversibel \\ = 0 \; Proses \; Reversibel \\ < 0 \; Proses \; Imposibel \end{cases}$$

3.1.5. Variabel Perhitungan Analisis Termal

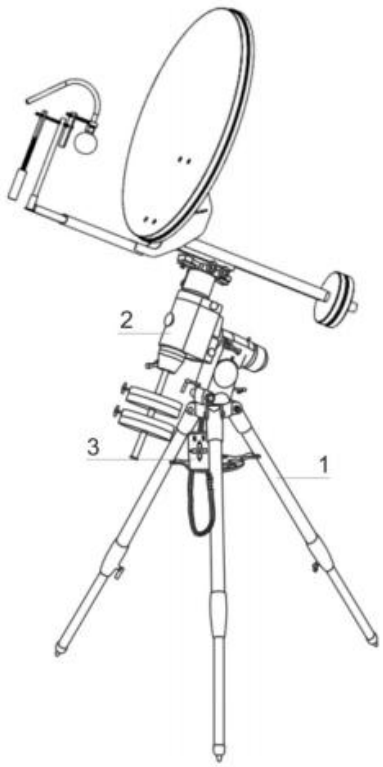
Dalam penelitian ini dengan menggunakan teori Schmidt, penelitian dilanjutkan untuk melihat bagaimana menvariasikan variabel dasar (temperatur eskpansi dan temperatur kompresi) dapat mempengaruhi performa dari mesin. Hal ini dilakukan agar kedepannya dapat membantu pengembangan penelitian dari mesin Stirling dengan mengetahui nilai kritis terendah dan tertinggi yang bisa diberikan kepada hasil rancangan ini.

Pada penelitian yang dilakukan Gustavo Otero dari Brazil mengenai teori dan percobaan performa *solar dish concentrator* didapatkan kesimpulan bahwa semakin kecil diameter *absorber* maka semakin tinggi pula temperatur panas terkonstrasi yang didapatkan (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016). Parameter desain dan hasil percobaan *solar dish concentrator* yang digunakan dalam penelitan tersebut adalah sebagai berikut :

Tabel 3.3. Parameter Parabola (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016)

Parameter	Keterangan	Tampak Depan
d	Diameter	0,68 m
f	Jarak titik fokus/*focal lenght*	0,5557 m
θ_{lim}	Sudut penerimaan/*acceptance angle*	4,91°
φ_r	Sudut lingkaran/*rim angle*	35,40°

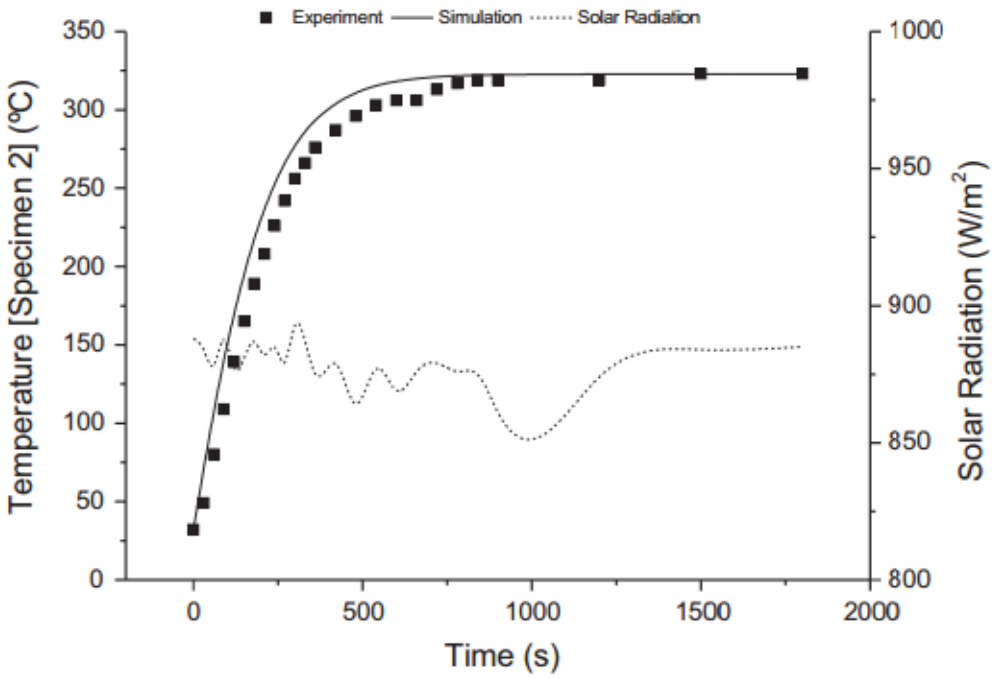
Bentuk skema gambar *assembling* dari sistem *solar dish concentrator* adalah sebagai berikut :



Gambar 3.22. Skema *assembling* unit pemisah air garam tenaga matahari/ *solar desalitanion unit* (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016)

Pada penelitian tersebut digunakan 3 jenis *absorber*/ alat penyerap energi matahari yang terkonsentrasi yaitu *absorber* berdiameter 0,1611 m², 0,1108 m² dan 0,1182 m², dimana ketiga *absorber* tersebut disebut sebagai Spesimen 1, Spesimen 2 dan *Evaporator*. Dari ketiga spesimen percobaan didapatkan pemanasan dinamik yang paling baik terdapat pada Spesimen 2. Percobaan berlangsung selama 1800 detik, dimulai dari temperatur *ambient* 32 °C hingga mencapai temperatur seimbang yaitu 319 °C dalam 840 detik. Laju kenaikan panas yaitu sebesar 20,5 °C/min dengan efisiensi panas konstan (η) dimulai dari

25,30% dengan kesalahan rata-rata 6% antara hasil simulasi dan percobaan. Grafik dari hasil percobaan Spesimen 2 adalah sebagai berikut :



Gambar 3.23. Pemanasan Dinamik Spesimen 2 (Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016)

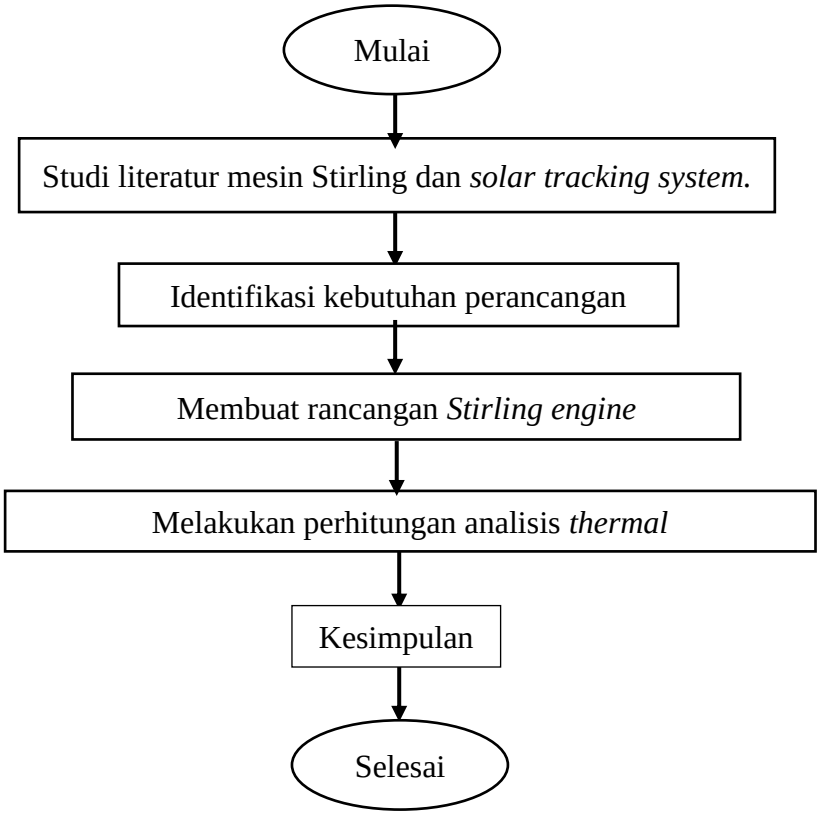
Dengan keadaan intensitas radiasi matahari yang sama dengan daerah Indonesia yaitu rata-rata berkisar 1000 W/m², maka hasil penelitian temperatur *absorber* yang dilakukan oleh Gustavo Otero dapat dijadikan bahan acuan untuk menentukan variasi dari temperatur ekspansi dan temperatur kompresi pada percobaan perhitungan variasi variabel dasar untuk mengetahui performa hasil rancangan.

3.2. Tempat dan Waktu Penelitian

Proses perancangan mesin Striling tipe Beta skala laboraturiom dan proses analisis menggunakan teori Schmidt dan hukum termodinamika II dilakukan di Laboratorium Termodinamika lt.2 gedung Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.3. Alur Penelitian

flow chart alur penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:



Gambar 3.24. Diagram Alur penelitian Rancangan Stirling Engine

BAB V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan yaitu perancangan mesin Stirling, didapatkan beberapa kesimpulan yaitu :

1. Mesin Stirling yang dipilih yaitu mesin Stirling tipe beta, dengan posisi piston panas/*displacer* dan piston dingin/daya berada pada satu garis/*line* serta berada dalam satu silinder. Dengan sudut fasa x = 90°, volume sapuan piston ekspansi/panas- V_{SE} sebesar 0,00110 m³, volume sapuan piston kompresi/daya- V_{SC} sebesar 0,00027 m³, volume titik mati ruang ekspansi- V_{DE} sebesar 0,00267915 m³, volume titik mati ruang kompresi- V_{DC} sebesar 0,000321196 m³, volume regenerator- V_R sebesar 7,06858x10^{-6} m³ dengan sistem penukaran panas berbentuk sirip sebagai sistem pendinginnya.

2. Dari hasil analisis *thermal* yang dilakukan menggunakan teori Schmidt sederhana, berdasarkan data teknis rancangan didapatkan nilai tekanan maksimal yaitu sebesar $113336{,}636\ Pa$ yaitu pada sudut x = 0° dan 180, nilai volume momentum total sebesar $0{,}005243317\ m^3$ yaitu pada sudut x = 190°.

3. Dari hasil analisis *thermal* yang dilakukan menggunakan teori Schmidt sederhana, berdasarkan hasil perhitungan didapatkan nilai energi indikator W_i sebesar $1{,}520185213\ J$. Daya indikator yang dihasilkan kecil yaitu sebesar 12,6682 Watt dan efisiensi *thermal* yang dihasilkan sebesar $47{,}1204\ \%$.

4. Dari hasil analisis *thermal* yang dilakukan menggunakan prinsip hukum termodinamika II didapatkan nilai entropi total sebesar $2{,}9487.10^{-13}$ J/kg.K, hal ini menunjukkan sistem pada mesin rancangan irreversibel dan dapat bekerja berdasarkan prinsip kenaikan entropi.

5.2. Saran

Peneliti menyadari masih banyak sekali kekurangan dari penelitian yang dilakukan, maka dari itu saran-saran yang diberikan yaitu :

1. Daya indikator hasil desain rancangan mesin Stirling tipe beta yang dihasilkan masih sangat kecil, diharapkan ada desain lanjutan yang dapat menghasilkan daya indikator yang lebih besar lagi.

2. Penelitian yang dilakukan hanya dalam tahapan proses rancangan sehingga analisis yang dilakukan terbatas, diharapakan ada kelanjutan sampai tahap proses manufacturing dan pengujian aktual untuk mendaptkan hasil analisis performa mesin yang sesungguhnya.

3. Teori schimdt yang digunakan dalam penelitian ini termasuk dalam teori Schmidt orde ke-satu atau sederhana, diharapkan selanjutnya dilakukan

analisis menggunakan teori Schmidt orde ke-dua dan ke-tiga serta dapat membandingkannya.

4. Variasi variabel yang digunakan masih terbatas dikarenakan teori Schmidt yang digunakan yaitu orde ke-satu. Diharapkan dengan menggunakan teori Schmidt orde ke-tiga atau analisis *Non-Dimensional* variabel yang digunakan dapat bervariasi sehingga akan didapatkan rancangan desain yang diinginkan.

5. Diharapkan ada penambahan sistem penukar panas seperti regenerator dan ruang ekspansi/silinder dingin yang tertutup sehingga dapat mengurangi panas yang terbuang dan meningkatkan nilai efisiensi mesin.

DAFTAR PUSTAKA

Cengel, Y. & Boles, M., 2006. *Thermodynamics: An Engineering Approach.* 5st penyunt. USA: WCB/McGraw-Hill.

EIA, 2006. *Short Term Energy Outlook.* s.l.:s.n.

F Kreith, J.F Kreider, 1973. *Principles of Solar Engineering.* New York: Harper & Row Publisher.

Graham, W., 1980. *Stirling Engines.* New York: Oxford University Press.

HIRATA, K., t.thn. *SCHMIDT THEORY FOR STIRLING ENGINES,* s.l.: National Maritime Research Institute.

Homutescu, C., Savitescu, G., Jugureanu , E. & Homutescu , Y., 2003. *Introduction in Stirling Machines.* Jassy: CERMI.

Kalogirou, S. A., 2004. Solar thermal collectors and applications. 30(231-295).

Krothapalli., D. A., 2005. *Energy Conversion Systems..* s.l.:http ://sesec.fsu/edu/lectures:htm.

Kumara, N. S., 2010. *PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA SKALA RUMAH TANGGA URBAN.* s.l.:s.n.

Kwankaomeng, 2008. *Design of a free-piston Stirling engine-pump,* Winsconsin: Madison.

Prado.G.O, Vieira.L.G, Damasceno.J.J.R, 2016. Solar Dish Concentrator for Desalting Water. *Solar Energy,* 136(659-667).

ŠKORPÍK, J., 2012. *Stirling engine cycle-supplement.* Dubrovnik–Croatia: The 15th International Stirling.

Widianto, A., 2007. *Kondisi Energi Primer Indonesia.* Yogyakarta: s.n.