

Pembuatan dan Pengujian Prototipe Mesin Stirling Tipe Gamma

Ika Yuliyani, Mochamad Irwan

Jurusan Teknik Konversi Energi, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40012
E-mail: i.yuliyani@gmail.com; mochamadirwan90@ymail.com

ABSTRAK

Krisis energi yang berkelanjutan mendorong manusia mencari teknologi yang dapat menjadi alternatif dalam energi terbarukan. Berbagai teknologi alternatif menjadi pilihan untuk menggantikan energi yang semakin lama akan semakin habis. Salah satunya adalah teknologi mesin stirling. Teknologi ini merupakan teknologi yang sudah lama namun pengembangannya kalah dengan mesin pembakaran dalam. Seiring dengan krisis energi yang terjadi mesin stirling ini kembali menjadi pilihan dikarenakan mesin stirling ini mempunyai fleksibilitas dalam hal bahan bakarnya. Mesin stirling dapat memanfaatkan panas dari berbagai bahan bakar seperti biomassa, biogas dan energi matahari. Pada pembuatan prototipe mesin stirling, langkah pertama melakukan perhitungan terlebih dahulu berdasarkan teori Schmidt. Dari hasil perhitungan didapat parameter volume silinder panas sebesar 113,04 cm³, volume sisa 14,13 cm³, dan diameter silinder panas 6 cm. Volume silinder dingin 78,5 cm³, volume sisa 1,963 cm³, diameter silinder dingin 5,4 cm. Dari hasil pembuatan prototipe mesin stirling dilakukan pengujian dengan hasil, mesin stirling mampu berputar dengan kecepatan maksimum 910 rpm tanpa beban dan 349,3 rpm dengan beban serta torsi yang dihasilkan 0,038 Nm. Mesin stirling berputar setelah silinder di sisi panas dipanaskan pada temperatur 300°C dengan menggunakan sumber panas spirtus. Mesin stirling dapat berputar sampai panas dari spirtus padam atau selama 10 menit.

Kata Kunci

Energi alternatif, teori Schmidt, mesin stirling.

1. PENDAHULUAN

Pada saat ini perkembangan motor bakar menuju ke arah motor bakar yang ramah lingkungan dan menekankan pada pemakaian biaya yang lebih rendah. Hal ini dimungkinkan karena adanya kenaikan harga bahan bakar minyak (BBM), kelangkaan sumber energi, sampai kepedulian tentang masalah lingkungan seperti pemanasan global.

Mesin stirling adalah mesin pembakaran eksternal dan yang menggunakan udara atau gas (helium, hydrogen, nitrogen, methanol dan sebagainya) sebagai fluida kerjanya dengan prinsip regeneratif siklus tertutup (*closed-cycle regenerative*). Selain itu mesin stirling merupakan mesin yang ramah lingkungan yang mempunyai kelebihan dalam hal variasi sumber energi sebagai penggerakannya karena seperti yang telah disebutkan di atas bahwa mesin stirling tergolong mesin pembakaran luar (*Eksternal Combustion Engine*).

Mesin stirling dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, diantaranya aplikasi multi bahan bakar, operasi yang tidak menginginkan kebisingan karena mesin stirling tidak mengeluarkan suara yang begitu bising dibandingkan dengan mesin pembakaran dalam, operasi putaran rendah, operasi yang membutuhkan daya keluaran yang konstan dan operasi yang perioda *warm-up*-nya lama.

Mesin stirling ini menurut konfigurasi terbagi menjadi tiga jenis yaitu tipe *alpha*, *beta* dan *gamma*. Dari ketiga jenis mesin stirling tersebut, yang memiliki kehandalan paling baik adalah mesin stirling tipe *gamma*.

2. DASAR TEORI

Teori Schmidt

Performansi dari mesin dapat dikalkulasi dari diagram P-V. Volume dari 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 seperti pada persamaan di bawah ini.

$$PV = mRT \quad (1)$$

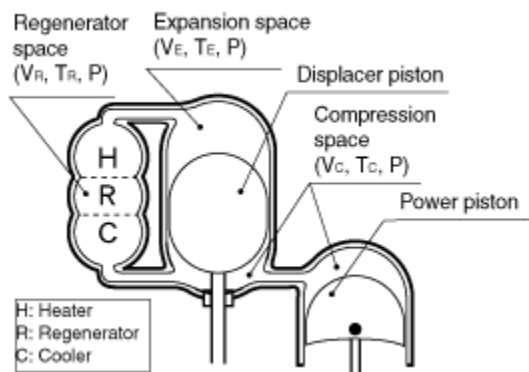
Dimana:

P	= Tekanan (Pa)
V	= Volume (m ³)
m	= massa gas (kg)
R	= konstanta gas (J/kgK)
T	= Temperatur (K)

Parameter-parameter motor stirling dapat dihitung dengan menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- Tidak ada *pressure loss* dan tidak ada perbedaan *internal pressure*.

- Proses ekspansi dan proses kompresi berlangsung secara isothermal.
- Kondisi fluida kerja adalah udara sebagai gas ideal.
- Terjadi regenerasi sempurna.
- Volume sisa pada silinder panas menjaga temperatur gas pada silinder panas - TE, volume sisa pada silinder dingin menjaga temperatur gas pada silinder dingin - TC selama siklus.
- Temperatur pada regenerator adalah rata-rata temperatur ekspansi - TE dan temperatur kompresi - TC.
- Volume ekspansi (VE) dan volume kompresi (VC) berubah berdasarkan fungsi sinusioda.



Gambar 1: Skema mesin stirling tipe *gamma*

Tabel berikut ini menunjukkan simbol-simbol yang digunakan pada proses perancangan motor stirling.

Tabel 2: Parameter-parameter mesin stirling

Nama	Simbol	Unit
Tekanan Mesin	P	Pa
Volume pada posisi piston ekspansi atau <i>displacer</i> piston	VE	m ³
Volume pada posisi piston kompresi atau <i>power</i> piston	VC	m ³
Volume sisa pada sisi ekspansi	VDE	m ³
Volume sisa pada sisi kompresi	VDC	m ³
Volume ekspansi	VE	m ³
Volume kompresi	VC	m ³
Volume total	V	m ³
Massa total gas kerja	m	Kg
Konstanta gas	R	J/kgK
Temperatur gas sisi ekspansi	TE	K
Temperatur gas sisi kompresi	TC	K
Phasa Angle	dx	Derajat(°)
Rasio temperature	t	
Rasio volume	V	
Rasio volume mati	X	
Kecepatan mesin	n	Rps
Energi indikator kompresi	WE	J
Energi indikator ekspansi	WC	J
Energi indikator	Wi	J
Daya indikator ekspansi	LE	W
Daya indikator kompresi	LC	W
Daya indikator	Li	W
Efisiensi	e	%

Volume dari silinder ekspansi dan silinder kompresi pada sudut engkol tertentu dihitung pertama. Volume sesaat

dideskripsikan dengan sudut engkol-x. Sudut engkol didefinisikan sebagai x=0 ketika piston ekspansi (piston pada silinder panas) ada pada posisi TMA. Volume ekspansi sesaat - VE dinyatakan pada persamaan (2) dengan asumsi (g).

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

Volume kompresi sesaat -VC dapat dihitung dengan persamaan (1) dan sudut fase - dx.

$$V_C = \frac{V_{SC}}{2} \{1 - \cos(x - dx)\} + V_{DC} \quad (3)$$

Volume total sesaat dihitung dengan menggunakan persamaan (4).

$$V = V_E + V_C + V_R \quad (4)$$

Tekanan mesin - P didasarkan dari tekanan rata-rata - Pmean, tekanan minimum - Pmin dan tekanan maksimum - Pmax dicari dengan persamaan.

$$P = \frac{P_{mean} \sqrt{1 - c^2}}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{min} (1 + c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} = \frac{P_{max} (1 - c)}{1 - c \cdot \cos(x - a)} \quad (5)$$

Dimana:

$$a = \tan^{-1} \frac{v \sin dx}{t + \cos dx + 1}$$

$$S = t + 2tX_{DE} + \frac{4tV_R}{1 + t} + v + 2X_{DC} + 1$$

$$B = \sqrt{t^2 + 2(t - 1)v \cos dx + v^2 - 2t + 1}$$

$$c = \frac{B}{S}$$

Rasio temperatur - t, rasio volume langkah - v dan rasio volume sisa dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini.

$$t = \frac{T_C}{T_E} \quad (6)$$

$$v = \frac{V_{SC}}{V_{SE}} \quad (7)$$

$$X_{DE} = \frac{V_{DE}}{V_{SE}} \quad (8)$$

$$X_{DC} = \frac{V_{DC}}{V_{SE}} \quad (9)$$

$$X_R = \frac{V_R}{V_{SE}} \quad (10)$$

Energi Indikator, Daya dan Efisiensi

Energi indikator (luas area dari diagram P-V) dapat dihitung sebagai solusi analitik dengan menggunakan koefisien-koefisien di atas. Energi indikator pada daerah ekspansi (*indicated expansion energy*) - WE(J), berdasarkan pada tekanan rata-rata - Pmean, tekanan

minimum- Pmin dan tekanan maksimum- Pmax diberikan pada persamaan di bawah ini.

$$\begin{aligned} W_E &= \int PdV_E = \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \\ &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi c \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (11)$$

Energi indikator pada daerah kompresi (*indicated compression energy*) - WC(J) diberikan pada persamaan di bawah ini.

$$\begin{aligned} W_C &= \int PdV_C = - \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \\ &= - \frac{P_{min} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= - \frac{P_{min} V_{SE} \pi c t \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (12)$$

Energi indikator per siklus pada mesin ini - Wi(J) dinyatakan pada persamaan di bawah ini.

$$\begin{aligned} W_i &= W_E + W_C \\ &= \frac{P_{mean} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \\ &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 + c}}{\sqrt{1 - c}} \\ &= \frac{P_{min} V_{SE} \pi c (1-t) \sin a}{1 + \sqrt{1 - c^2}} \cdot \frac{\sqrt{1 - c}}{\sqrt{1 + c}} \end{aligned} \quad (13)$$

Hubungan antara Pmean, Pmin and Pmax diberikan pada persamaan di bawah ini.

$$\frac{P_{min}}{P_{mean}} = \frac{1 - c}{1 + c} \quad (14)$$

$$\frac{P_{max}}{P_{mean}} = \frac{1 + c}{1 - c} \quad (15)$$

Daya indikator ekspansi - LE(W), daya indikator kompresi - LC(W) dan daya indikator mesin ini -Li(W) diberikan melalui persamaan di bawah ini, menggunakan kecepatan putar mesin per detik, n(rps).

$$L_E = W_E n \quad (16)$$

$$L_C = W_C n \quad (17)$$

$$L_i = W_i n \quad (18)$$

Kemudian, efisiensi thermal dari mesin - e dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini.

$$e = \frac{W_i}{W_E} \quad (19)$$

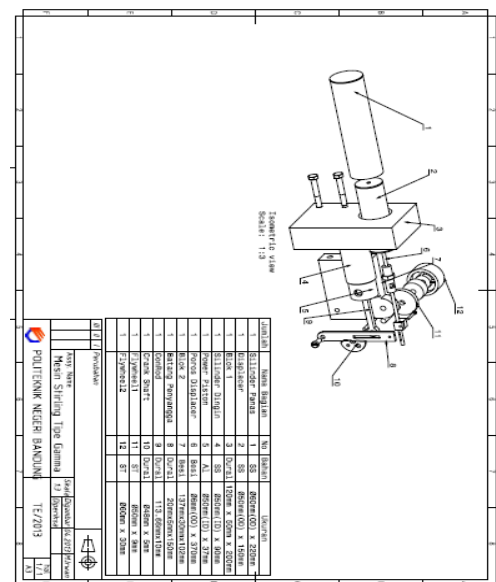
3. DESAIN DAN PEMBUATAN ALAT

Dalam pembuatan prototipe mesin stirling terdapat beberapa tahap yang dilakukan yaitu perhitungan awal untuk menentukan dimensi mesin dengan menggunakan persamaan-persamaan teori Schmidt, pembuatan gambar kerja menggunakan *software* CAD, pemilihan bahan, permesinan, perakitan dan pengujian.

Perhitungan dilakukan secara teoritis berdasarkan persamaan 1-19. Mesin Stirling didesain berdasarkan perhitungan dengan parameter temperatur, volume dan kecepatan mesin. Parameter temperatur dan kecepatan mesin didapat berdasarkan referensi.³ Temperatur silinder panas mesin stirling 300°C dan temperatur silinder dingin 30°C.

- Penentuan Diameter Silinder Panas dan *Displacer*
- Penentuan Diameter Silinder Dingin dan *Power Piston*
- Penentuan Panjang Silinder Panas dan *Displacer*
- Penentuan Panjang Silinder Dingin dan *Power Piston*
- Penentuan Dimensi *Crankshaft*
- Penentuan Dimensi *Flywheel* 1
- Perhitungan Rasio Temperatur, Rasio Volume dan Rasio Volume Sisa
- Perhitungan Kinerja Motor Stirling Desain

Tahap pembuatan gambar kerja dengan menggunakan *software* CAD (CATIA V5R19) dilakukan untuk memudahkan pada tahap pembuatan komponen dan perakitan mesin stirling.



Gambar 2: Desain awal mesin stirling tipe gamma

Tabel 2: Komponen dan bahan yang digunakan pada mesin stirling

Nama Komponen	Bahan
Silinder Panas	Stainless steel
Displacer	Alumunium
Flywheel 1	Stainless steel
Flywheel 2	Besi

Heatsink	Alumunium
Silinder dingin	Stainless steel
Blok 1	Dural
Batang Penggerak	Dural
Conrod	Besi
Crankshaft	Besi
Poros Displacer	Stainless steel
Blok 2	Besi



Gambar 3. Hasil perakitan dan perbaikan mesin stirling tipe gamma

4. PENGUJIAN ALAT

Pengujian alat dilakukan menggunakan sumber panas dari pemanas untuk pengelasan asetilin. Peralatan ukur yang diperlukan pada pengujian ini sebagai berikut:

1. Termometer infrared untuk mengukur temperatur silinder panas dan dingin
2. Tachometer stroboskop digunakan untuk mengukur putaran mesin
3. Timbangan, tali dan beban untuk mengukur torsi mesin dengan metode rem tali
4. Burner dan tabung gas butane serta spirtus untuk memanaskan mesin stirling

Tabel 2: Data pengujian alat setelah perbaikan

Waktu	Temperatur			Putaran Mesin
	Silinder Panas (T_h)	Silinder Dingin (T_c)	Heatsink	
Menit ke-	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	rpm
2	300,9	30,0	34,6	385,0
4	310,8	31,0	36,8	900,0
	313,9	31,1	37,9	910,9
6	317,9	33,1	41,0	872,9
	317,9	33,1	40,0	810,6

8	319,7	34,0	40,0	762,1
	320,0	34,0	41,0	650,0
10	311,7	34,6	41,0	409,9

5. PEMBAHASAN

Pada pengujian awal mesin stirling ini tidak dapat bekerja ataupun tidak mencapai parameter kinerja sesuai rancangan. Maka dilakukan perbaikan dan penambahan komponen, dikarenakan desain awal yang dibuat mesin tidak dapat bekerja pada saat dilakukan pengujian.

Perbaikan komponen pada mesin stirling dilakukan diantaranya pada:

1. Conrod dan Piston.

Pada komponen *conrod*, dilakukan perubahan dengan panjang dan tebal yang lebih kecil, yaitu panjang dari *conrod* dirubah menjadi 90 mm dan tebal 4 mm. Pada komponen *conrod* juga, dilakukan perubahan bahan menjadi besi. Pada permukaan piston dibuat menjorok kedalam 1 mm agar menjadi tempat pelumas.

2. Displacer

Pada komponen *displacer* dilakukan perubahan pada bahannya yaitu dari bahan *stainless steel* menjadi bahan alumunium. Sifat alumunium yang secara cepat menyerap panas dapat membantu proses pendinginan udara panas sebelum masuk kedalam silinder dingin.

3. Crankshaft

Komponen *crankshaft* dilakukan perubahan ukuran, bahan maupun bentuk. Dari hasil pengujian-pengujian sebelumnya didapat bahwa mesin tidak mempunyai tolakan untuk membantu mesin berputar secara terus menerus dan hal ini dapat dilakukan dengan mengubah komponen *crankshaft*. Komponen inilah yang mampu membantu mesin berputar secara terus menerus selain *flywheel*.

4. Flywheel

Flywheel dilakukan penggantian dengan yang mempunyai massa lebih berat agar membantu tolakan mesin sehingga mesin dapat berputar secara terus menerus.

Dari perbaikan dan penyempurnaan yang telah dilakukan, maka mesin stirling menjadi sedikit berbeda dengan awalnya.

Analisis Hasil Pengujian Alat.

Hasil pengujian setelah dilakukan perbaikan diketahui bahwa mesin stirling dengan menggunakan sumber panas dari spirtus mampu memanaskan silinder panas sampai temperature 320 $^{\circ}\text{C}$. Sumber panas inilah yang digunakan untuk menggerakkan piston dari silinder panas ke silinder dingin. Pengujian berlangsung selama spirtus sebagai sumber panas menyala yaitu sekitar 10 menit.

Selama pengujian mesin stirling mampu menghasilkan putaran sampai 910,9 rpm. Putaran 900 rpm dicapai setelah

pengujian mencapai waktu 4 menit dan temperature silinder panas mencapai 310,8°C.

Selama pengujian yang berlangsung selama kurang lebih 10 menit mesin stirling mengalami penurunan kecepatan putaran setelah melewati waktu pengujian 5 menit. Hal ini disebabkan karena terjadi kebocoran pada bagian silinder dingin dan *powerpiston*. Kebocoran tersebut menyebabkan tekanan didalam silinder menjadi berkurang. Hal ini yang menyebabkan kecepatan mesin semakin lama semakin berkurang.

Agar pembuatan mesin stirling menjadi lebih baik, maka dalam pembuatannya harus lebih memperhatikan hal-hal berikut:

- a. Gesekan antara power piston dan dinding silinder panas diharapkan sekecil mungkin bahkan tidak terjadi.
- b. Gesekan power piston dan dinding silinder dingin harus sekecil mungkin dan harus menghasilkan kompresi yang baik.
- c. Pemilihan bahan yang harus sesuai dengan karakteristik tiap komponen.
- d. Harus adanya regenerator/heat sink/pendinginan yang baik antara sisi dingin dan sisi panas untuk menciptakan perbedaan temperatur yang baik.
- e. Hindari kebocoran pada mesin dibagian manapun agar udara benar-benar vakum dan menghasilkan kinerja yang baik.

6. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan, pembuatan dan serangkaian pengujian alat dapat disimpulkan bahwa:

- a. Ukuran mesin stirling keseluruhan yaitu 400,71mm x 120mm x 200mm.
- b. Mesin stirling yang telah dibuat dapat berputar dengan menghasilkan putaran maksimum 910,9, rpm tanpa dibebani.
- c. Mesin dapat berputar dengan pemanasan pada silinder panas dengan temperatur 300,9°C dan temperatur silinder dingin 30°C.
- d. Mesin mampu berputar selama sumber panas yang diberikan pada silinder sisi panas masih menyala. Hasil pengujian, mesin dapat berputar selama 10 menit hingga sumber panas dari spirtus padam.
- e. Masih terjadi sedikit kebocoran pada silinder dingin dan piston yang menyebabkan putaran mesin semakin lama semakin menurun.

ACKNOWLEDGEMENT

Penelitian ini didukung oleh Jurusan Teknik Konversi Politeknik Negeri Bandung

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Christop, Maier, et.al.. 2007. *Stirling Engine*. University of Gävle
- [2] Chen, when-lih, King-Leung Wong, Li Wen Po. *A numerical analysis on the performance of a pressurized twin power piston gamma-type Stirling engine*. Taiwan: Clean Energy Center.
- [3] Khirata, Koichi . Bekkoame Home Page, *Schmidt theory for Stirling engines* . Stirling engine home page [online]. diakses tanggal 3 Januari 2013. dari : http://www.bekkoame.ne.jp/_khirata
- [4] Lloyd, Caleb C.. 2009. *A Low Temperatur Differential Stirling Engine ForPower Generation*. University of Catenbury.
- [5] Maleev, V.L.. 1945. *Internal Combustion Engines– Theory and Design* 2nd edition.
- [6] London: McGraww-Hill Book Company, Inc.
- [7] Martini, William M..1978. *Stirling Engine Design Manual 2nd Edition* . Washington D.C: University of Washington, Prepared for NASA.
- [8] Miller, Fletcher J. 2009. *Stirling Solar Engine Design Report* . San Diego State University.
- [9] *Power from the Sun*. (2008). *Power Cycles for Electricity Generation*. Diakses 15 Oktober 2012 dari <http://www.powerfromthesun.net/Book/chapter12/cha pter12.html#12.3> Stirling Cycle Engines
- [10] Yuliarto M, Anggit. 2010. *Perencanaan Termodinamika dan Pengujian Prototipe Motor Stirling Tipe Alpha Dengan Konvigurasi V-90*. Bandung: ITENAS.