

Rancangan Mesin Stirling Memanfaatkan Komponen Mesin Lain Yang Ada Di Pasaran Indonesia Sebagai Pembangkit Listrik

Roni Zakaria^{*1)}, Ilham Priadythama²⁾, dan Nugroho Eka Budiyanto³⁾

¹⁾Laboratorium Sistem Logistik dan Bisnis, Jurusan Teknik Industri, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36 A, Surakarta 57126, Indonesia

²⁾Laboratorium Perancangan dan Perencanaan Produk, Jurusan Teknik Industri, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36 A, Surakarta 57126, Indonesia

³⁾Jurusan Teknik Industri, Universitas Sebelas Maret
Jl. Ir. Sutami 36 A, Surakarta 57126, Indonesia

Abstract

Stirling engine technology is an old technology that was developed to be a power back. In America and in Europe the development of Stirling engine has been done so far by utilizing production technology and advanced materials. This research uses the technology micro-scale workshop and uses the other engine components that exist on the market to accommodate the volume Stirling engine design compressor size. In performance testing, this study used crankschaft axle load testing methodology. Testing is done by 5 (five) times. From the data at average constant speed, travel time and expense it can be calculated that the engine power is generated. The results of this study produced a prototype Stirling engine with a pressure of 1 bar gamma type. In addition to the prototype machine, the performance measurement analysis used as the input source in the development later of the Stirling engine to produce competitive and cheap.

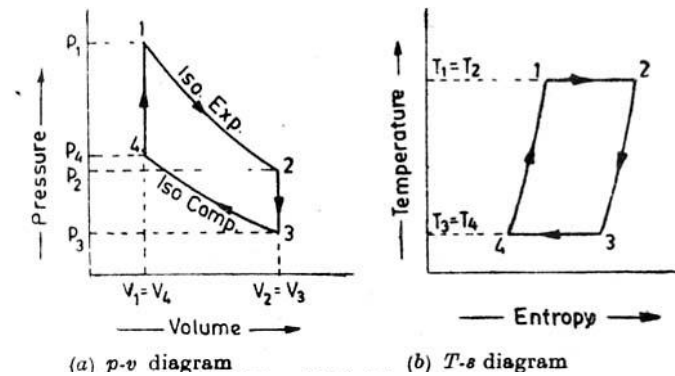
Keywords: *Stirling engine, micro-scale workshop, prototype, loading test, development.*

1. Pendahuluan

Mesin Stirling merupakan teknologi lama yang dikembangkan kembali pada zaman ini. Teknologi ini kembali dikembangkan karena dibutuhkan teknologi yang ramah lingkungan, sumber energi fleksibel, dan efisiensi tinggi. Telah diketahui bahwa secara teori, Mesin Stirling merupakan teknologi yang memiliki efisiensi mendekati efisiensi Carnot dengan proses isothermal dan isokhorik. Teknologi ini mengkonversi energi panas menjadi energi mekanik. Dari energi mekanik dapat dikonversi menjadi energi listrik jika dihubungkan pada dinamo generator listrik.

Mesin-mesin ini bekerja dengan memanfaatkan sifat gas yang dipanaskan akan memuai kemudian saat didinginkan gas akan menyusut volumenya. Salah satu contoh siklus tertutup yang dapat digunakan dalam merancang mesin yang ramah lingkungan Mesin Stirling (Moran dan Shapiro, 2000). Saat ini dalam pengembangan Mesin Stirling untuk kebutuhan produksi massal baru mampu menghasilkan daya terbesar mencapai 3 kilowatt listrik. Mesin-mesin Stirling yang berdaya besar pada umumnya menggunakan volume kecil namun dengan tekanan puluhan bar (Minassian, 2007). Mesin seperti ini harus memiliki teknologi material dan manufaktur yang tinggi. Mesin-mesin ini mulai dikembangkan di Eropa dan Amerika dikarenakan memiliki potensi yang cukup besar layaknya panel solar-sel untuk menghasilkan energi listrik bagi kebutuhan rumah tangga.

Dalam siklus mesin stirling berlaku 2 fase yaitu 2 proses iso-termal dan 2 proses iso-khorik. Dua proses terakhir terjadi dengan bantuan sebuah regenerator untuk membuat siklus ini reversibel. Diagram p-v dan T-s siklus ini ditunjukkan pada gambar 1 (Daryus, 2002).



Gambar 1. a) Diagram p-v dan **b)** Diagram T-s pada siklus stirling
Sumber: Daryus, 2002

Udara berekspansi secara isothermal, 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 isothermal. Sekarang udara lewat melalui regenerator dan didinginkan pada volume konstan ke temperatur T_3 . Proses ini digambarkan oleh grafik 2-3 pada diagram p-v dan T-s. Pada proses ini kalor dibuang ke generator. Udara dikompresi secara isothermal di dalam silinder mesin dari v_3 ke v_4 . Proses ini digambarkan oleh grafik 3-4 pada diagram p-v dan T-s. Lagi kalor dibuang oleh udara. Terakhir, udara dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_1 dengan melewati udara ke regenerator dalam arah yang berlawanan dengan proses 2-3. Pada proses ini kalor diserap oleh udara dari regenerator selama proses ini, yaitu proses 4-1 (Daryus, 2002).

Apabila Mesin Stirling ini dikembangkan di Indonesia, proses produksi akan dilakukan pada level rumah tangga dengan beberapa bagian mesin disubstitusi komponen mesin lain bertujuan untuk menekan biaya riset dan menekan lamanya waktu produksi. Hal ini memiliki resiko adanya penurunan kinerja mesin akibat tingkat akurasi perakitan yang belum terjamin.

2. Perancangan dan Pengujian Produk

2.1 Metode Penelitian

Penelitian diawali dengan mencari beberapa sumber mengenai perkembangan Mesin Stirling. Dari beberapa sumber tersebut dijadikan masukan mengenai sistem yang bekerja, pemilihan material, dan kendala yang mungkin muncul. Untuk produksi melakukan tinjauan dan konsultasi pada pihak workshop mengenai efisiensi produksi untuk menghasilkan produk yang presisi.

Dalam merancang Mesin Stirling, penelitian ini memanfaatkan beberapa part mesin dari genset, kendaraan bermotor, dan beberapa dibuat sendiri dengan mesin bubut. Pemilihan mesin berdasarkan tingkat kompatibilitas dengan blok mesin kompresor yang dipakai. Setelah mesin selesai dirangkai kemudian dilakukan pengujian beban poros mesin untuk mendapatkan tenaga mesin yang mampu dicapai.

Pengujian beban membutuhkan katrol teflon yang licin untuk mengurangi atau bahkan menghilangkan gesekan pada tali, beban uji sebagai pembebanan mesin, tali pengerek beban, dan papan lintasan sebagai panjang jalur yang ditempuh. Dalam pengujian terdapat beberapa variabel yang diukur yaitu variabel kecepatan laju, kecepatan sudut putar mesin, dan waktu, sedangkan untuk jarak lintasan ditetapkan diawal dan beban uji dilakukan pemilihan dengan menguji kemampuan mesin mengangkat. Setelah didapatkan hasil pengujian sebanyak 5 kali kemudian dihitung daya selama pengujian dan daya rata-rata mesin selama pengujian.

Kemudian dianalisis efisiensi mesin maupun perbaikan yang diperlukan terhadap kekurangan pada mesin yang telah dirancang.

2.2 Identifikasi Kebutuhan Perancangan

Pada awal perancangan, memilih Mesin Stirling sebagai penelitian disebabkan beberapa alasan adalah sebagai berikut:

1. Adanya kebutuhan teknologi yang ramah lingkungan dalam memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga.
2. Mesin stirling memiliki keunggulan dalam modifikasi karena menggunakan *piston* dan *crankshaft* seperti mesin-mesin yang ada di pasaran sehingga dapat menggunakan mesin bekas yang ada.
3. Meneliti mesin stirling untuk dikembangkan sebagai alat yang dapat diaplikasikan dalam kehidupan manusia yang berhubungan dengan sistem mekanik.

Dalam melakukan perancangan Mesin Stirling maka dibutuhkan suatu pengujian kelayakan dari rancangan Mesin Stirling untuk pembangkit listrik. Kelayakan Mesin Stirling yang dapat digunakan pada pemenuhan kebutuhan listrik meliputi beberapa aspek:

1. Biaya produksi dimana untuk melihat seberapa besar modal awal untuk menggunakan Mesin Stirling hingga dapat memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga.
2. Daya yang mampu dihasilkan dimana untuk menentukan seberapa besar mesin yang harus dirancang.
3. Tingkat kompetitif baik aspek durasi mesin hingga terjadi perbaikan maupun beban biaya listrik dari Mesin Stirling terhadap biaya listrik yang sudah ada dari PLN.

Dalam merancang dilakukan pencarian *part-part* yang sesuai dengan tersedia di pasaran, melakukan perancangan konstruksi, dan pengujian kinerja mesin yang dirancang.

2.3 Pendekatan Prototipe

Dalam perancangan Mesin gamma Stirling, digunakan beberapa part hasil *custom* maupun dari *part* mesin lain dengan beberapa alasan. *Part* yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. *Power piston* aslinya bertujuan untuk mengurangi beban biaya sesuai dengan keputusan yang diambil.
2. *Thorax displacer piston* terbuat dari batang logam yang telah dilapisi krom merupakan satu paket dalam membuat *displacer* yang bertujuan tidak mudah terkikis saat bergesekan dengan jalur *thorax piston*.
3. Selang penghubung *power piston* dengan *displacer* terbuat dari bahan aslinya dari jenis campuran karet dan plastik sesuai dengan penekanan beban biaya yang dipilih.
4. *Radiator* air terbuat dari alumunium untuk mengoptimalkan penyerapan panas dari silinder *displacer*.
5. Silinder *displacer* terbuat dari material besi untuk ketahanan saat temperatur tinggi.

Dalam dunia Mesin Stirling telah dikembangkan berbagai bentuk tipe Mesin Stirling. Adapun alasan penulis memilih Mesin Stirling tipe gamma dengan konfigurasi L 90⁰ (sembilan puluh derajat) berpendingin air dengan tekanan standar udara luar sistem adalah sebagai berikut:

1. Penggunaan stirling tipe gamma, *displacer piston*nya tidak selalu terbakar oleh gas panas melainkan dalam fungsinya memindahkan gas panas berpindah ke sisi dingin dengan diikuti *displacer* berpindah ke sisi dingin. *Displacer* pada tipe gamma juga memiliki keunggulan bahwa *piston*nya tidak bergesekan langsung kepada silinder *displacer* yang selalu menerima panas dari luar.
2. Konfigurasi 90⁰ (sembilan puluh derajat) digunakan dikarenakan dengan satu jenis *crankshaft* dapat digunakan oleh 2 (dua) jenis *piston* secara bersamaan pada bagian langkahnya, ini disebabkan mesin stirling membutuhkan overlapping sudutnya antara

power piston dengan displacer untuk membuat iso khorik (tekanan yang sama) maupun saat menyebabkan perbedaan tekanan di antara kedua piston.

3. Pendingin air atau radiator air dipilih sebagai pendingin mesin stirling disebabkan kemampuan air untuk menyerap panas yang signifikan. Di daerah tropis dibutuhkan pendingin yang tidak terpengaruh oleh kelembapan, sedangkan pendingin udara kurang mendinginkan disebabkan oleh cuaca, temperatur, dan kelembapan daerah tropis yang tinggi.
4. Tekanan yang digunakan setara dengan udara luar bertujuan dalam pembangkitan gerak pada mesin stirling tidak membutuhkan temperatur yang sangat tinggi.

2.4 Prototipe

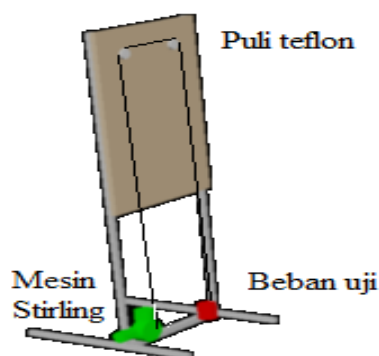
2.4.1 Metodologi Pengujian Mesin

Pengujian mesin gamma stirling yang sudah selesai dirakit dari mesin bekas kompresor dimana telah mengalami modifikasi dengan menggunakan bandul beban katrol yang dirangkai pada papan yang telah ditemplei meteran yang dapat menunjukkan panjang lintasan sebagai torsi untuk dikonversi menjadi daya, sesuai dengan rumus yang telah ditulis pada landasan teori, yang dihasilkan pada putaran poros *crankshaft*.

Bandul dirakit dengan katrol berbahan nilon agar gesekan pada katrol menjadi licin. Bandul dengan beban tertentu diujikan untuk mendapatkan daya dan torsi yang dapat dicapai mesin stirling. Pengujian ini dilakukan karena adanya keterbatasan alat yang dapat digunakan dalam pengujian pembebanan. Dengan metode pembebanan dinamo terkendala dengan dinamo magnet yang sebelumnya telah digunakan oleh penulis yang kurang baik pada bagian poros maupun magnet di dalamnya. Untuk alat torsi meter tidak tersedia yang memilikinya sehingga diputuskan dengan sistem pembebanan bandul pada poros *crankshaft*.

Lintasan bandul yang digunakan dalam pengukuran berjarak 1 meter dimana diletakkan dengan jarak toleransi untuk mesin melakukan percepatan maksimal terlebih dahulu. Jari-jari penggulung benang yang digunakan berukuran 1,2 sentimeter. Beban yang mampu terangkat pada pengujian adalah 100 gram bandul dengan keadaan berjalan konstan dalam keadaan laju lambat. Percepatan gravitasi yang digunakan sebesar 10 m/s^2 .

Untuk mengukur kecepatan putaran poros *crankshaft* digunakan rumus yang telah ada berdasarkan kecepatan yang didapatkan pada pengumpulan data. Data yang didapatkan kemudian diolah sehingga didapatkan hasil akhir berupa kemampuan meliputi daya dan energi yang dapat dicapai mesin dalam keadaan minimal, maksimal, dan rata-rata.



Gambar 2. Rangkaian lintasan dan katrol uji

2.4.2 Hasil Pengujian Prototipe

Dari pengujian didapatkan 5 data percobaan. 5 data yang didapatkan masih dalam bentuk waktu tempuh yang perlu diolah dengan rumus-rumus hitung seperti dibawah ini untuk dihasilkan daya mesin pada poros putarnya. Data yang diolah sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil pengujian pembebanan pada mesin gamma stirling 53,11 cc

percobaan ke-	waktu(detik)	kecepatan(m/s)	kecepatan sudut (RPM)	daya(watt)
1	11,2	0,089285714	446,4285714	0,089285714
2	13,9	0,071942446	359,7122302	0,071942446
3	9,2	0,108695652	543,4782609	0,108695652
4	8,7	0,114942529	574,7126437	0,114942529
5	10,9	0,091743119	458,7155963	0,091743119
rata-rata	10,78	0,095321892	476,6094605	0,095321892
maksimum	8,7	0,114942529	574,7126437	0,114942529
minimum	13,9	0,071942446	359,7122302	0,07192446

Keterangan:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{bandul}} &: 100 \text{ gr} \\
 g_{\text{bumi}} &: 10 \text{ ms}^{-2} \\
 S_{\text{lintasan}} &: 1 \text{ m} \\
 R_{\text{poros}} &: 1,2 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Contoh perhitungan:

$$\begin{aligned}
 W_{\text{bandul}} &= m \cdot g \text{ [N]} & (1) \\
 &= 0,1 \cdot 10 \text{ N} \\
 &= 1 \text{ N}
 \end{aligned}$$

$$F = W_{\text{bandul}}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Percobaan 1: } v &= \frac{s}{t} \text{ [m/s]} & (2) \\
 &= 1/11,2 \text{ m/s} \\
 &= 0,089285714 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P &= F \cdot v \text{ [W]} & (3) \\
 &= 1 \cdot 0,089285714 \text{ W} \\
 &= 0,089285714 \text{ W}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \omega &= \frac{v}{R} \cdot 60 \text{ [RPM]} & (4) \\
 &= 0,089285714 \cdot 60 / 0,012 \text{ RPM} \\
 &= 446,4285714 \text{ RPM} \\
 &= 458,7155963 \text{ RPM}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Rata-rata: } V' &= \frac{v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5}{5} \text{ [m/s]} & (5) \\
 &= (0,089285714 + 0,071942446 + 0,1086957 + 0,089285714 + 0,091743119) / 5 \text{ m/s} \\
 &= 0,095321892 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P' &= F \cdot v \text{ [W]} \\
 &= 1 \cdot 0,095321892 \text{ W} \\
 &= 0,095321892 \text{ W} \\
 \omega' &= \frac{v \text{ rate}}{R} \cdot 60 \text{ [RPM]} \\
 &= 0,095321892 \cdot 60 / 0,012 \text{ RPM} \\
 &= 476,60946 \text{ RPM}
 \end{aligned}$$

Konversi pada sistem kelistrikan dengan asumsi dinamo tegangan 12 volt:

$$\begin{aligned}
 I &= \frac{P}{V} \text{ [A]} & (6) \\
 &= 0,095321892 / 12 \text{ A} \\
 &= 0,007943491 \text{ A} \\
 &= 7,9 \text{ mA}
 \end{aligned}$$

Untuk pengukuran energi yang mampu diserap oleh mesin maka digunakan perhitungan konduksi benda yang berupa aluminium *heat transferer* sebagai berikut:

$$P = \frac{K.A.\Delta T}{L} \text{ [W]} \quad (7)$$

$$= (237.2\pi \cdot 0,026 \cdot 0,18((213-58)+273))/(0,003)$$

$$= 993.748,2 \text{ W}$$

$$Q = P \cdot t \text{ [J]} \quad (8)$$

$$= 993.748,2 \cdot 1 \text{ J}$$

$$= 993.748,2 \text{ J}$$

Efisiensi terhadap kinerja yang didapatkan terhadap energi kalor yang diberikan:

$$\mu = \frac{E_{kerja}}{E_{kalor}} \cdot 100\% \quad (9)$$

$$= 100.1/9937482 \%$$

$$= 0,00001\%$$

Efisiensi terhadap kinerja yang didapatkan terhadap energi potensial gas dalam mesin:

$$\mu = \frac{E_{kerja}}{E_{potensial\ gas}} \cdot 100\% \quad (10)$$

$$= 100.1/23,6 \%$$

$$= 4,3\%$$

3. Simpulan dan Saran

Mesin Stirling yang diuji menghasilkan daya sebesar 0,1 W @477 RPM dimana daya kompetitif untuk bersaing dengan genset 1 HP masih terlalu jauh capaiannya. Efisiensi termal yang dapat dicapai sebesar 22,77% dan efisiensi mesin sebesar 4,3% dimana pada genset berbahan bakar bensin mampu mencapai efisiensi mesin sekitar 20-30%. Dari perancangan yang dilakukan perlu pembenahan agar tercapai kinerja yang maksimal bahkan diharapkan mampu mencapai tujuan pemenuhan kebutuhan energi listrik masyarakat. Perbaikan yang dibutuhkan sebagai berikut: tekanan yang digunakan mesin stirling harus diatas 1 bar; perlu perbaikan penjabaran decision tree analysis dengan komparasi beberapa ahli agar didapatkan angka probabilitas yang lebih objektif; manufaktur membutuhkan workshop dengan teknologi tinggi dan part-part mesin membutuhkan bahan material yang terbaik untuk ketahanan durasi penggunaan panjang; memerlukan perbaikan efisiensi energi di dalam kinerja mesin baik pendinginan mesin maupun penyerapan panas dari sumber dan regenerator; dan memerlukan penggunaan gas mulia seperti helium untuk mampu melakukan penyerapan dan pelepasan energi secara cepat.

Daftar Pustaka

- Arsdell, H. V. (2002). *Stirling Engine*. San Diego.
- Boyle, G. (2004). *Renewable Energy: Power For Sustainable Future*. Oxford.
- Daryus, S. (2002). *Termodinamika Teknik 1*. Jakarta.
- Kontax Engineering, Ltd. Historical of Stirling engine, <http://www.stirlingengine.co.uk>, Diakses pada tanggal 8 Agustus 2011.
- Lucas, D.M, Raine, J.K. (1994). Development of A Hermetically Sealed Stirling Engine Battery Charger. *Journal of Developing Stirling Engine*, Christchurch.
- Minassians, A.D. (2007). *Stirling Engines for Low-Temperature Solar-Thermal-Electric Power Generation*. California.
- Moran, M.J, Shapiro, H.N. (2000). *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. Ohio.