

Performance of solar dish stirling engine for remote area needs

Imansyah Ibnu Hakim, Hafizh Bramantya Rizaldi Putra

Laboratorium Perpindahan Kalor, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia
Kampus Baru, Depok, Jawa Barat, 16424
Email korespondensi: imansyah@eng.ui.ac.id

Abstrak

Kebutuhan listrik merupakan kebutuhan utama masyarakat Indonesia dan setiap orang. Pada tahun 2020, terdapat 433 desa tanpa listrik di Indonesia. Indonesia memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. Menurut Kementerian ESDM, total potensi energi terbarukan Indonesia adalah 417,8 gigawatt (GW). Potensi terbesar berasal dari energi surya atau matahari sebesar 207,8 GW. Salah satu cara untuk memanfaatkan potensi energi surya yaitu dengan menggunakan Solar Dish Stirling Engine. Kajian ini menggunakan mesin stirling tipe alpha dan udara sebagai fluida kerja. Kajian ini bertujuan untuk mengetahui kecepatan putaran mesin, daya output mesin stirling, dan efisiensi daya output mesin stirling dengan menggunakan empat variasi panjang lengan piston yaitu 5 cm – 5 cm (L_H-L_C), 5 cm – 4,3 cm (L_H-L_C), 4,3 cm – 5 cm (L_H-L_C), dan 4,3 cm – 4,3 cm (L_H-L_C). Pada kajian ini, digunakan lampu halogen 500 Watt sebagai pengganti sumber panas matahari. Dari hasil kajian, diperoleh kecepatan rpm maksimum pada 852 rpm dengan panjang lengan di 5 cm – 5 cm (L_H-L_C). Hasil kajian juga diperoleh bahwa kecepatan putaran mesin optimum terdapat pada panjang lengan 5 cm – 5 cm (L_H-L_C) dengan nilai 0,39 W pada 839 rpm. Kinerja atau efisiensi mesin stirling ini terbesar yaitu 6,5% pada panjang lengan 5 cm – 5 cm (L_H-L_C).

Kata kunci: mesin stirling, parabolic dish concentrator, energi matahari, mesin pembakaran luar.

Abstract

The need for electricity is the main need of the Indonesian people, and everyone. In 2020, there are 433 villages without electricity in Indonesia. Indonesia has great potential as a source of renewable energy. According to the Ministry of Energy and Mineral Resources, Indonesia's total renewable energy potential is 417.8 gigawatts (GW). The greatest potential comes from the sun at 207.8 GW. One way to utilize the potential of solar energy is to use the Solar Dish Stirling Engine. This research uses an alpha stirling engine and uses air as the working fluid. This initial research of the solar dish Stirling engine aims to determine engine performance with parameters such as engine rotation speed, Stirling engine output power, and Stirling engine output power efficiency. The experiment was carried out using four variations of the piston arm length, namely 5 cm – 5 cm (L_H-L_C), 5 cm – 4.3 cm (L_H-L_C), 4.3 cm – 5 cm (L_H-L_C) and 4.3 cm – 4.3 cm (L_H-L_C), and used a 500 Watt halogen lamp as a substitute for the solar heat source. From the results of the study, the maximum rpm speed was obtained at 852 rpm with an arm length of 5 cm – 5 cm (L_H-L_C). The results of the study also showed that optimum engine rotation speed was found in the length of the arm 5 cm – 5 cm (L_H-L_C) with a value of 0.39 W at 839 rpm. Finally, it is known that the largest stirling engine efficiency is 6.5% at arm length 5 cm – 5 cm (L_H-L_C).

Keywords: stirling engine, dish concentrator, solar energy, external combustion engine.

1. Pendahuluan

Kebutuhan listrik merupakan kebutuhan utama masyarakat Indonesia, mulai dari penerangan hingga usaha kecil maupun besar, menggunakan listrik untuk berbagai keperluan. Sayangnya, sebagai pemasok listrik terkemuka di tanah air, PLN belum dapat memenuhi kebutuhan listrik di beberapa kotamadya. Pada tahun 2020, terdapat 433 desa tanpa listrik di Indonesia. Padahal, jumlahnya tidak banyak jika dibandingkan dengan jumlah desa di sana. Terdapat desa tanpa listrik di empat provinsi : 325 desa di Papua, 102 desa di Papua Barat, 5 desa di Nusa Tenggara Timur dan 1 desa di Maluku [17]. Situasi ini mempersulit pembangunan ekonomi, sosial dan budaya di daerah-daerah tersebut. Seiring bertambahnya jumlah penduduk Indonesia,

kebutuhan listrik di Indonesia juga semakin meningkat [18].

Saat ini, kita sangat bergantung pada bahan bakar tradisional seperti batu bara, solar dan gas alam untuk memenuhi permintaan listrik [19]. Secara khusus, bahan bakar fosil adalah sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui, sehingga tidak mungkin selalu menggunakan bahan bakar fosil untuk produksi energi. Oleh karena itu, ada kekurangan pasokan energi listrik [3].

Konsumsi listrik per kapita nasional mencapai 1,08 kWh per kapita pada tahun 2019 [4]. Konsumsi ini meningkat 2,26% dibandingkan tahun sebelumnya. Konsumsi listrik pada tahun 2020 diperkirakan sebesar 1,14 kWh per orang. Konsumsi listrik per kapita ini dihitung berdasarkan perbandingan konsumsi listrik dibagi dengan jumlah penduduk

negara tersebut [15]. Salah satu cara agar kebutuhan listrik di daerah terpencil tercukupi dengan menggunakan energi terbarukan.

Energi surya merupakan bagian dari energi terbarukan. Salah satu cara untuk memanfaatkan potensi energi surya yaitu dengan menerapkan prinsip mesin *stirling* [16]. Sistem mesin *Stirling* yang menggunakan energi surya adalah salah satu dari solusi yang paling menjanjikan karena teknologinya menggabungkan dengan mudah sumber daya yang tersedia dengan siklus termal yang sederhana dan efisien [6]. Mesin *stirling* menyajikan beberapa keuntungan, seperti aspek termodinamika dengan efisiensi tinggi, kemampuan untuk menggunakan sumber panas apapun, termasuk bahan bakar, solar, panas bumi atau panas buangan, dan tingkat kebisingan yang rendah. Mesin *stirling* memiliki *life time* 3 sampai 10 tahun dan efisiensi global yang mencapai 30% [10].

Solar Dish Stirling Engine merupakan satu dari 3 teknologi panas matahari yang mempunyai efisiensi tertinggi [7]. Suatu sistem yang mengumpulkan dan memfokuskan panas dari matahari pada *collector* yang dapat digunakan untuk menggerakkan *generator* dan menghasilkan listrik [8]. Teknologi ini menggabungkan mesin *Stirling* dengan suatu alat optik atau *reflector* yang akan membuat radiasi matahari terkonsentrasi pada sebuah *thermal receiver* atau *absorber* yang terhubung dengan *hot chamber* dari mesin, sehingga menghasilkan suhu yang tinggi [27]. *Solar Dish Stirling Engine* juga dapat diterapkan untuk pembangkit listrik tenaga berskala kecil sampai sedang. *Solar dish Stirling Engine* dapat disinergikan dengan penyimpanan panas (*thermal storage*) atau hibridasi dengan teknologi dengan sumber daya lainnya [6].

Solar Dish Stirling System (SDSS) telah diusulkan sebagai teknologi yang menjanjikan untuk pembangkit listrik bersih komersial dan aplikasi terdistribusi *smart grid*. Sistem ini memiliki keunggulan dibandingkan pembangkit listrik konvensional karena menghasilkan daya bersih dengan modularitas tinggi (3–45 kW), yang cocok untuk pembangkitan terdistribusi dan beroperasi dengan tenang dibandingkan dengan mesin diesel atau bensin [29].

Pada tahun 2010, Imperial Valley Solar/SES Solar yang diusulkan dibangun di Imperial County, California, Amerika Serikat. Ini memiliki kolektor berdiameter 11,6 m, bahan reflektor kaca lengkung segi cermin, menghasilkan sekitar 750 kW dan efisiensi sistem maksimal 31,25% [9]. Selain itu, Pada tahun 2016 kolektor parabola RIPASSO di Afrika Selatan. Dia memiliki diameter kolektor 14,5 m, bahan reflektor aspek cermin kaca melengkung yang menghasilkan sekitar 60 MW dan efisiensi sistem maksimal 32% [11].

Berdasarkan uraian di atas, perlu melakukan kajian tentang bagaimana mengoptimasi teknologi *Solar Dish Stirling* (SDS) dengan melihat pengaruh dari jenis fluida kerja terhadap efisiensi absorber, efisiensi total dan daya *output system* [12]. Diharapkan kajian ini dapat membantu lainnya melakukan inovasi baru dalam penggunaan sumber daya matahari menggunakan mesin *Stirling*.

Matahari memiliki energi yang sangat besar. Energi ini dipindahkan ke permukaan bumi melalui perpindahan panas secara radiasi. Radiasi matahari dihasilkan oleh gelombang elektromagnetik yang memiliki karakteristik umum yang sama tetapi efeknya berbeda [20]. Hal ini karena panjang gelombang setiap cahaya berbeda. Semua panjang gelombang dalam rentang inframerah, cahaya tampak, dan bagian dari spektrum ultraviolet disebut radiasi termal karena menyebabkan pemanasan di wilayah spektrum elektromagnetik ini. Radiasi panas terjadi pada spektrum cahaya dengan panjang gelombang $0,1 \times 10^{-6}$ s/d 100×10^{-6} m [1].

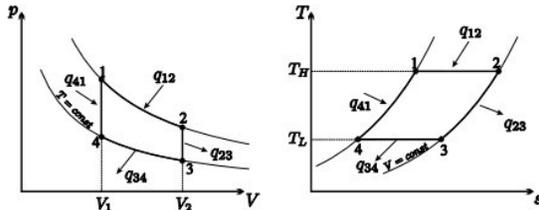
Indonesia terletak di garis khatulistiwa, sehingga Indonesia mempunyai sumber energi matahari yang berlimpah dengan intensitas radiasi matahari rata-rata sekitar $4,8 \text{ kWh/m}^2$ per hari di seluruh wilayah Indonesia. Pemanfaatan energi ini dapat dilakukan secara termal maupun melalui energi listrik. Pemanfaatan secara termal dapat dilakukan secara langsung dengan membiarkan objek pada radiasi matahari, atau menggunakan peralatan yang mencakup kolektor dan konsentrator surya, sehingga dapat digunakan secara langsung untuk memproduksi listrik atau untuk memanaskan bahan yang menjadi sumber energi pada *generator* listrik.

Mesin pembakaran luar atau yang bisa disebut dengan *External Combustion Engine* (ECE) merupakan suatu proses di mana ada pembakaran yang terjadi di luar mesin [21]. Hal-hal yang dimiliki mesin pembakaran luar adalah dapat memakai segala jenis bahan bakar, dapat memakai bahan bakar bermutu rendah, cocok digunakan untuk melayani beban-beban besar dalam satu poros, serta cocok dipakai untuk menghasilkan daya tinggi [22].

Secara historis, mesin *Stirling* adalah mesin pertama dengan regenerasi [31]. Regenerator bekerja dengan menyerap energi dari gas yang dikirim dari pemanas ke pendingin dan melepaskan energi dari gas yang dikirim dari pendingin ke pemanas, membantu meminimalkan energi yang dikonsumsi oleh pemanas menjadi wadah dan perangkat penyimpanan panas [2]. Proses suplai dan pembuangan panas ini harus dilakukan dalam kondisi isothermal. Regenerator memainkan peran ini sebagai fitur yang berbeda dari siklus Carnot [30].

Pada Gambar 1, memperlihatkan siklus ideal mesin *Stirling* terdiri dari dua peristiwa isothermal dan dua peristiwa isokhorik [31]. Siklus ideal diagram *p-V* dan

$T-s$ dari mesin *Stirling* tidak ada irreversibilitas internal dalam siklus.



Gambar 1. Diagram P-V dan T-s mesin stirling [31].

Karena energi internal (u) gas ideal hanya bergantung pada suhu $u = u(T)$, pertukaran panas yang terjadi selama proses isokhorik adalah sama, tetapi dalam arah yang berbeda [23].

$$q_{23} = u(T_L) - u(T_H) = -q_{41} [J] \quad (1)$$

Oleh karena itu, panas yang dihasilkan oleh proses 2-3 (q_{23}) yang dilepaskan selama proses pendinginan volume konstan dapat digunakan untuk proses pemanasan volume konstan (q_{41}). Ini dapat dilakukan dengan bantuan regenerator yang dapat bertindak sebagai penukar panas internal. Jika regenerator dipasang, kalor q_{41} dipertukarkan secara internal dan kalor q_{12} diperoleh dari sumber panas eksternal atau dengan memanaskan bahan bakar secara eksternal [25].

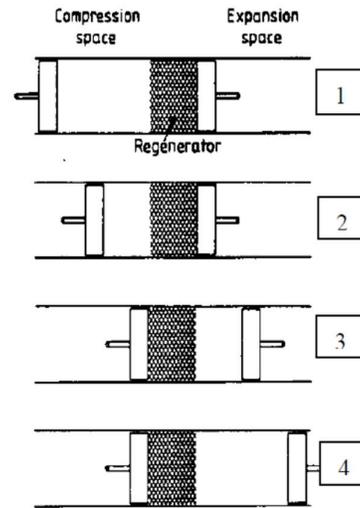
Dengan T_H dan T_L adalah suhu dari reservoir yang di dalam siklus tersebut terdapat pertukaran kalor. Rumus efisiensi termal sama dengan efisiensi Carnot yang merupakan efisiensi maksimum bagi proses perpindahan panas beroperasi antara reservoir-reservoir dengan suhu T_H dan T_L .

Harus diperhitungkan bahwa pertukaran panas selama proses volume konstan q_{23} dan q_{41} hanya dapat dicapai dengan menggunakan gas ideal dengan panas spesifik konstan atau variabel. Dalam hal ini, energi internal proses tidak bergantung pada panas spesifik. Konduktivitas yang tinggi dari gas dengan berat molekul rendah menyebabkan pertukaran panas yang cepat. Ini berarti bahwa mesin berjalan pada frekuensi tinggi [32].

Secara teori, efisiensi termal mesin *Stirling* dapat mendekati efisiensi Carnot, dan hambatan perpindahan panas dan kehilangan energi seperti kebocoran gas dan kehilangan panas dapat dilihat pada keadaan mesin *Stirling* yang sebenarnya [1]. Kehilangan panas dapat dikurangi dengan memperluas silinder lebih lanjut dengan suhu pemanasan yang lebih tinggi dan lebih banyak percikan api yang dihasilkan oleh bahan bakar campuran [33]. Jika ada hambatan termal antara media kerja dan sumber panas, yang ideal, mesin *Stirling* harus beroperasi tanpa batas untuk mencapai keluaran nol. Dengan kata lain, mesin *Stirling* yang sebenarnya perlu dijalankan untuk waktu yang terbatas [34].

Secara umum, mesin *Stirling* dapat dibagi menjadi dua kelompok yakni mesin piston bebas dan mesin kinematik [33]. Untuk piston bebas, piston mesin dan pemindah disinkronkan oleh pegas dan tekanan gas. Motor kinematik, di sisi lain, memiliki berbagai macam mekanisme gerak, yaitu: *crank*, *rhombic*, *lever*, *Rose-yoke*, *Leybold* dan lain lain [31].

Mesin *stirling* memiliki banyak mekanisme penggerak piston, jadi ada berbagai prinsip penggerak [31]. Kerja mesin *Stirling* dihasilkan untuk memampatkan gas (minyak hidrolik) pada suhu rendah, kemudian gas dipanaskan dan tekanannya naik. Selanjutnya, gas panas bertekanan tinggi mengembang dan mendorong piston, melakukan lebih banyak pekerjaan daripada yang pertama dan mengompresi gas dingin. Akhirnya, gas didinginkan sebelum siklus baru dimulai untuk kompresi baru. [2].



Gambar 2. Prinsip kerja mesin stirling [26].

Salah satu ruang piston seperti pada Gambar 2 diisi dengan oli hidrolik, yang dipanaskan hingga suhu dan tekanan tinggi. Antara langkah 1 dan 2, panas dipindahkan dari posisi semula. Ketika gas (minyak hidrolik) memuai atau pada suhu isothermal, piston di sisi kiri bergerak ke luar untuk bekerja dan tekanan gas turun. Kemudian, selama proses 2 sampai 3, piston bergerak ke kanan dengan kecepatan yang sama dan mempertahankan volume konstan sampai semua gas bergerak ke ruang piston kanan (pendinginan isokhorik). Saat gas mengalir melalui regenerator (jika dipasang), panas dari gas dipindahkan ke regenerator dan suhu gas turun dari suhu ke suhu [30].

Kemudian, pada proses 3-4, piston di sebelah kanan bergerak ke dalam *chamber* dan memampatkan gas. Selama proses berlangsung, panas gas dialirkan ke *sink* pada suhu tertentu untuk mempertahankan keadaan terkompresi (kompresi isothermal). Akhirnya,

pada proses 4 ke 1, seperti pada proses 1-2, kedua piston bergerak ke kiri dengan kecepatan yang sama, sehingga semua gas bergerak ke ruang piston kiri. Selain itu, selama proses transfer gas, suhu gas naik sampai melewati regenerator, proses menyerap panas dan menyimpannya untuk proses [30].

Mesin *stirling* dibagi menjadi tiga tipe yakni tipe alpha, tipe beta, dan tipe gamma, tergantung pada konfigurasi piston. Mesin *stirling* memiliki dua piston, satu atau dua silinder dengan piston panas dan dingin. [33]. Dalam arti, piston panas terkena sumber suhu panas dan piston dingin terkena sumber suhu dingin [1]. Silinder mesin *Stirling* juga berperan di mana daerah suhu tinggi merupakan posisi pemuaian oli hidrolik dan daerah suhu rendah merupakan posisi kompresi. Dua silinder dapat ditempatkan sejajar atau tegak lurus satu sama lain [5].

Mesin *Stirling* tipe Alpha memiliki dua *power* piston dengan pendingin, pemanas, dan pemulihan panas antara dua silinder. Ruang atas piston panas dan dingin masing-masing terus dipanaskan dan didinginkan. Pada tipe alpha, piston secara bersamaan melakukan tugas kompresi dan ekspansi fluida dan juga tugas perpindahan fluida antara silinder dingin dan panas. Tipe Alpha memiliki rasio daya terhadap volume yang lebih tinggi daripada tipe mesin *Stirling* lainnya, dan dapat dengan mudah diubah menjadi tipe multi-silinder. Sebagian besar mesin industri bertenaga tinggi menggunakan jenis mesin *Stirling* ini dibandingkan dengan tata letak lainnya.

Mesin *Stirling* tipe alpha terdiri dari dua *power* piston, *crankshaft*, regenerator dan *flywheel*. Kegunaan dari bagian-bagian mesin *stirling* yakni *power* piston, sebagai sarana untuk menghasilkan kerja dan daya dari siklus mesin. *Crankshaft*, sebagai pusat *shaft* yang akan diputar dan dapat digunakan untuk menghasilkan kerja awal dan daya output nantinya. *Flywheel*, sebagai *starter* dari mesin *Stirling* yang memberikan usaha melalui *crankshaft*. *Flywheel* dan *crankshaft* merupakan suatu *part* yang unik. Regenerator, Sebagai tempat pertukaran udara antara silinder panas dan silinder dingin [28].

Belum ditemukan data yang cukup untuk menentukan fluida mana yang cocok sebagai fluida hidrolik sebagai penggerak utama mesin *Stirling*. Namun, sebelumnya telah dijalankan model numerik yang bertujuan untuk menemukan dan mengevaluasi cairan yang tepat untuk hasil yang optimal untuk kinerja dan efisiensi maksimum. Fluida hidrolik yang diuji adalah hidrogen, helium, udara, dan karbon dioksida [24]. Fluida kerja terbaik diukur dengan tingginya koefisien perpindahan kalor dan *friction loss* yang lebih besar atau lebih kecil. Koefisien perpindahan kalor dan *friction loss* dapat secara sederhana ditentukan jika fluida mengalir secara laminar dan diam pada ruang geometrika sederhana.

Mesin panas berbasis energi surya adalah salah satu alat yang paling penting dan telah menjadi fokus

banyak selama bertahun-tahun. Mesin *Stirling*, yang menggunakan energi matahari, diperkenalkan oleh Roelf pada tahun 1987. Oleh karena itu, banyak yang bersaing untuk karakteristik kinerja yang optimal dari sistem mesin panas fotovoltaik Sterling [24]. *Solar Dish Stirling* adalah salah satu cara paling mungkin untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik. *Solar Dish Stirling* ini sudah berhasil dikonstruksi dan dioperasikan di beberapa negara. Teknologi ini mempunyai beberapa keuntungan diantaranya efisiensi termal yang tinggi (dibandingkan teknologi yang lain dari energi surya), sumber panas yang beragam dan kapasitas daya yang cukup besar [13].

Untuk mengetahui efisiensi yang dihasilkan dari mesin *stirling*, dibutuhkan data kalor pada silinder panas dan dingin yang dihasilkan oleh mesin *stirling* [14].

$$Q_1 = nRT_1 \ln \lambda + nC_p(1 - \varepsilon)(T_1 - T_2) \quad (2)$$

Setelah mendapatkan Q_1 silinder panas, dicari Q_2 silinder dingin dengan Persamaan 3.

$$Q_2 = nRT_2 \ln \lambda + nC_p(1 - \varepsilon)(T_1 - T_2) \quad (3)$$

Di mana R , n , C_p , dan λ merupakan konstanta gas universal, bilangan mol fluida, *specific heat capacity*, dan rasio volume. Setelah mendapatkan Q_1 dan Q_2 dapat dicari daya output dari mesin *stirling* dengan Persamaan 4 berikut.

$$P = \frac{Q_1 - Q_2}{t} [W] \quad (4)$$

Selanjutnya, dapat dicari efisiensi mesin *stirling* dengan Persamaan 5 berikut.

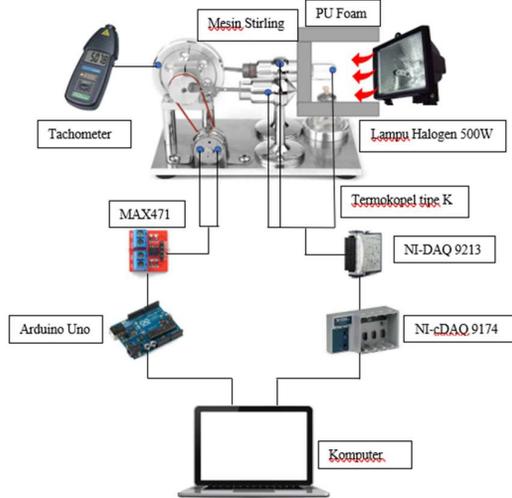
$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \times 100\% \quad (5)$$

2. Metode

Studi diawali dengan mengidentifikasi permasalahan, menentukan metode serta solusi yang ingin digunakan, kemudian dilanjutkan dengan mencari studi literatur yang berkaitan dan dapat membantu dalam kajian ini. Setelah dilakukan studi literatur, langkah selanjutnya adalah membuat desain *Solar Dish* dan sistem insulasi. Untuk memastikan pengujian berjalan dengan baik dan alat-alat ukur berfungsi dengan baik, maka perlu dilakukan *preliminary experiment*. Kemudian dilakukan pengujian pengambilan data yang nantinya akan digunakan sebagai data eksperimen. Data eksperimen ini kemudian diolah dan dianalisis hingga dapat ditarik kesimpulan dari percobaan yang telah dilakukan.

Skema pengujian dapat dilihat pada Gambar 3, pengambilan data suhu diambil menggunakan sensor termokopel tipe K yang disambungkan ke NI-DAQ 9213, kemudian disambungkan ke NI-cDAQ 9174

sebagai *data logger* yang kemudian akan disambungkan ke komputer. Sedangkan untuk pengambilan data putaran mesin menggunakan *Tachometer*. Pengambilan data daya output menggunakan modul MAX471. Modul MAX471 ini dapat digunakan untuk mengukur tegangan dan arus.

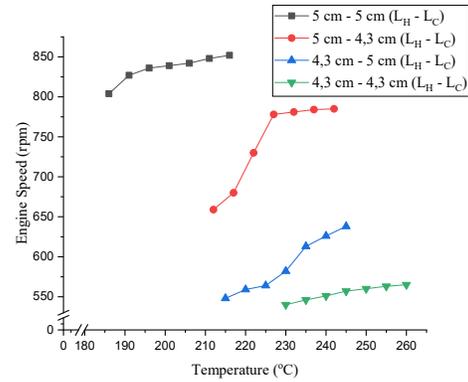


Gambar 3. Skema pengambilan data.

Pada pengambilan data kecepatan mesin *stirling*, *tachometer* digunakan sebagai alat ukur untuk mengukur kecepatan mesin *stirling*. *Tachometer* diarahkan tegak lurus ke *flywheel* mesin *stirling*. Suhu mesin *stirling* diukur dengan menggunakan termokopel tipe k yang ditempel di bagian *absorber* mesin *stirling*. Data diambil setiap kenaikan suhu 5°C di *absorber* mesin *stirling*.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada kajian ini, digunakan empat variasi dari lengan piston silinder panas dan dingin. Terdapat dua panjang lengan yang dikaji pada masing-masing lengan piston. Lengan piston yang diuji memiliki panjang 4,3 cm dan 5 cm di setiap piston. Lengan piston silinder panas ditulis dengan simbol L_H dan lengan piston dingin ditulis dengan simbol L_C . Empat variasi lengan piston adalah 5 cm – 5 cm ($L_H - L_C$), 5 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$), 4,3 cm – 5 cm ($L_H - L_C$), dan 4,3 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$).

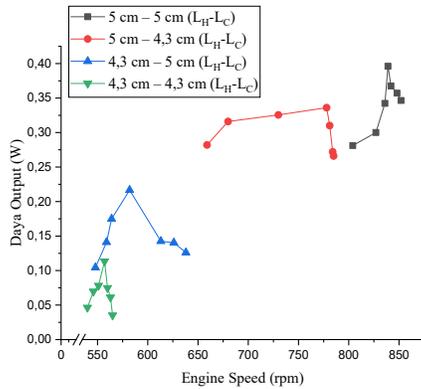


Gambar 4. Grafik perbandingan suhu (°C) dan kecepatan putaran mesin (rpm).

Pada Gambar 4, terlihat bahwa kenaikan suhu berbanding lurus dengan kecepatan putaran mesin. Saat panjang lengan di 5 cm – 5 cm ($L_H - L_C$), mesin *stirling* mulai bekerja di suhu 186°C. Panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) memiliki kecepatan putaran mesin terendah pada 804 rpm dan tertinggi pada 852 rpm. Saat panjang lengan di 5 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$), mesin *stirling* mulai bekerja saat suhu *absorber* di 212°C. Panjang lengan 5 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$) memiliki kecepatan mesin minimal pada 659 rpm dan maksimal pada 785 rpm. Pada panjang lengan 4,3 cm – 5 cm ($L_H - L_C$) mesin mulai bekerja di suhu 215°C. Panjang lengan 4,3 cm – 5 cm ($L_H - L_C$) memiliki kecepatan mesin minimal pada 548 rpm dan maksimal pada 633 rpm. Saat panjang lengan di 4,3 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$), mesin *stirling* mulai bekerja saat suhu *absorber* di 230°C. Panjang lengan 4,3 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$) memiliki kecepatan mesin minimal pada 540 rpm dan maksimal pada 565 rpm.

Kecepatan putaran mesin maksimum terdapat pada 852 rpm dengan panjang lengan di 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$). Sedangkan putaran mesin minimal terdapat pada 540 rpm dengan panjang lengan di 4,3 cm – 4,3 cm ($L_H - L_C$). Dapat dilihat bahwa dengan naiknya suhu *absorber* akan berpengaruh dengan kenaikan kecepatan putaran mesin.

Data daya output *Solar Dish Stirling Engine* diambil dengan menggunakan modul Arduino MAX471 yang disambungkan ke Arduino Uno sebagai *data logger*. Arduino MAX471 dapat membaca data tegangan dan arus. Arduino MAX471 disambungkan pada *generator* yang terdapat pada mesin *stirling* untuk membaca daya yang dihasilkan. Gambar 5 merupakan grafik daya output yang dihasilkan empat variasi lengan piston.



Gambar 5. Grafik perbandingan daya output dan kecepatan putaran mesin.

Perbandingan antara daya output dengan kecepatan putaran mesin pada Gambar 5. dapat dilihat bahwa panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) menghasilkan daya 0,39 W di 839 rpm dan daya minimum 0,28 W di 804 rpm. Pada panjang lengan 5 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$) menghasilkan daya maksimum 0,336 W di 778 rpm dan daya minimum 0,226 W di 659 rpm. Pada panjang lengan 4,3 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) menghasilkan daya maksimum 0,21 W di 582 rpm dan daya minimum 0,12 W di 548 rpm. Pada panjang lengan 4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$) menghasilkan daya maksimum 0,11 W di 557 rpm dan daya minimum 0,03 W di 540 rpm.

Dari data yang diperoleh, daya output maksimum terdapat pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) dengan nilai 0,39 W pada 839 rpm, sedangkan daya minimum terdapat pada lengan 4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$) dengan nilai 0,03 W di 540 rpm. Daya output mesin *stirling* akan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran mesin, tetapi akan menurun dikarenakan karena laju perpindahan panas yang tidak mencukupi. Kecepatan putaran mesin optimum berada pada 839 rpm yang menghasilkan 0,39 W pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$).

Efisiensi mesin *stirling* dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang terdapat pada Persamaan 5. Perhitungan Q_1 silinder panas dengan menggunakan rumus yang terdapat pada Persamaan 2 dan mencari Q_2 silinder dingin dengan rumus Persamaan 3. Mencari Q_1 silinder panas dengan perhitungan sebagai berikut.

$$Q_1 = 0,0004 \times 8,314 \times 343 \times 0,05 \times 0,0004 \times 1,9 + 0,0004 \times 1000(1 - 0,82)(343 - 311) = 12,3 \text{ J}$$

Setelah mendapatkan Q_1 silinder panas, dicari Q_2 silinder dingin dengan Persamaan 3 dengan perhitungan sebagai berikut.

$$Q_2 = 0,0004 \times 8,314 \times 311 \times 0,05 \times 0,0004 \times 1,9 + 0,0004 \times 1000(1 - 0,88)(343 - 311) = 11,5 \text{ J}$$

Selanjutnya dimasukkan ke Persamaan 4 untuk mencari daya output.

$$P = \frac{12,3 - 11,5}{0,007} = 114,28 \text{ W}$$

Setelah mendapatkan Q_1 dan Q_2 , dapat dihitung efisiensi dari mesin *stirling* setiap variasi panjang lengan piston dengan menggunakan rumus Persamaan 5.

$$\eta = \frac{12,3 - 11,5}{11,5} \times 100\% = 6,5\%$$

Data efisiensi setiap lengan panjang piston dapat dilihat pada Tabel 1, yaitu efisiensi mesin *stirling* terbesar sebesar 6,5% pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) yang menghasilkan 114,28 W, sedangkan efisiensi terendah terdapat pada panjang lengan 4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$) dengan nilai 3,6% yang menghasilkan 41,8 W. Mesin *stirling* memiliki kinerja terbaik pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$).

Tabel 1. Efisiensi mesin *stirling*.

Panjang Lengan ($L_H - L_C$)	Daya Output (W)	Efisiensi Mesin <i>Stirling</i>
5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$)	114,28	6,5%
5 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$)	71,25	4,6%
4,3 cm - 5 cm ($L_H - L_C$)	50	3,7%
4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$)	41,8	3,6%

4. Kesimpulan

Kecepatan putaran mesin maksimum terdapat pada 852 rpm dengan panjang lengan di 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$). Sedangkan putaran mesin minimal terdapat pada 540 rpm dengan panjang lengan di 4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$). Kenaikan suhu *absorber* akan berpengaruh dengan kenaikan kecepatan putaran mesin. Kecepatan putaran mesin optimum berada pada 839 rpm yang menghasilkan 0,39 W pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$). Daya output mesin *stirling* akan meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan putaran mesin, tetapi akan menurun dikarenakan laju perpindahan panas yang tidak mencukupi. Efisiensi mesin *stirling* terbesar yaitu 6,5% pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$) yang menghasilkan

114,28 W, sedangkan efisiensi terburuk terdapat pada panjang lengan 4,3 cm - 4,3 cm ($L_H - L_C$) dengan nilai 3,6% yang menghasilkan 41,8 W. Mesin *stirling* memiliki kinerja terbaik pada panjang lengan 5 cm - 5 cm ($L_H - L_C$).

Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah berkontribusi dalam melaksanakan kajian ini, khususnya para peneliti, dosen, dan mahasiswa di Applied Heat Transfer Research Grup, Lab. Heat Transfer, Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia.

Daftar Pustaka

- [1] Abuelyamen, A., & Ben-Mansour, R. (2018). Energy efficiency comparison of Stirling engine types (α , β , and γ) using detailed CFD modeling. *International journal of thermal sciences*, 132, 411-423. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2018.06.026
- [2] Andersen, S. K., Carlsen, H., & Thomsen, P. G. (2006). Numerical study on optimal Stirling engine regenerator matrix designs taking into account the effects of matrix temperature oscillations. *Energy Conversion and Management*, 47(7-8), 894-908. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.006
- [3] Arif Nugroho, A. (2017). Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Stirling Engine. Seminar Nasional Peranan Ipteks Menuju Industri Masa Depan (PIMIMD-4), 5-8. https://doi.org/10.21063/pimimd4.2017.6-10
- [4] Arifin dkk. (2014). Makalah Pemanfaatan Energi. Makalah Pemanfaatan Energi.
- [5] Assal, A. M., Atia, M. R., & Shaaban, S. (2018). Performance of solar dish Stirling engine systems under Egyptian operating conditions. *Engineering Research Journal*, 160, 79-104. doi:10.21608/erj.2018.139543
- [6] Barreto, G., & Canhoto, P. (2017). Modelling of a Stirling engine with parabolic dish for thermal to electric conversion of solar energy. *Energy Conversion and Management*, 132, 119-135. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.011
- [7] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2020). Radiation: Processes and Properties. In T. L. Bergman, A. S. Lavine, F. P. Incropera, & D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed., pp. 701-784). Nashville: John Wiley & Sons.
- [8] Breeze, P. (2018). Stirling Engines and Free Piston Engines. In P. Breeze, *Piston Engine-Based Power Plants* (pp. 59-70). Elsevier. doi:10.1016/C2016-0-03647-1
- [9] Boretti, A. (2021). α -Stirling hydrogen engines for concentrated solar power. *International journal of hydrogen energy*, 46(29), 16241-16247. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.02.036
- [10] Caetano, B. C., Lara, I. F., Borges, M. U., Sandoval, O. R., & Valle, R. M. (2019). A novel methodology on beta-type Stirling engine simulation using CFD. *Energy Conversion and Management*, 184(November 2018), 510-520. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.01.075
- [11] Farsakoglu, O. F., & Alahmad, A. (2018). Comprehensive Design of Stirling Engine Based Solar Dish Power Plant with Solar Tracking System. *Journal of Electrical & Electronic Systems*, 07(01), 1-5. https://doi.org/10.4172/2332-0796.1000248
- [12] Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2016). Solar parabolic dish Stirling engine system design, simulation, and thermal analysis. *Energy Conversion and Management*, 126, 60-75. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.067
- [13] Hayat, M. B., Ali, D., Monyake, K. C., Alagha, L., & Ahmed, N. (2019). Solar energy-A look into power generation, challenges, and a solar-powered future. *International journal of energy research*, 43(3), 1049-1067. doi:10.1002/er.4252
- [14] Katooli, M. H., Moghadam, R. A., & Hooshang, M. (2020). Investigation on effective operating variables in gamma-type Stirling engine performance: a simulation approach. *SN applied sciences*, 2(4). doi:10.1007/s42452-020-2526-5
- [15] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2019). Konsumsi Listrik Perkapita.
- [16] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2021). Potensi Energi Terbarukan.
- [17] Kementerian ESDM. (2020). Elektrifikasi Daerah Terpencil.
- [18] Nugroho, A. A. (2017). Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan Stirling Engine. Seminar Nasional Peranan Ipteks Menuju Industri Masa Depan (PIMIMD-4) (pp. 6-10). Padang: ITP Press. doi:10.21063/pimimd4.2017.6-10
- [19] PT Perusahaan Listrik Negara. (2021). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik PT Perusahaan Listrik Negara (PERSERO) Tahun 2021 Sampai Dengan Tahun 2030. Jakarta: PT Perusahaan Listrik Negara.
- [20] Raghavendra, H., Raju, P. S., & Reddy, K. H. (2022). Effect of geometric and operational parameters on the performance of a beta-type Stirling engine: A numerical study. *Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Mechanical Engineering*, 46(1), 1-13. doi:10.1007/s40997-020-00406-0
- [21] Riyadi Prabowo Moecty, G. A., & Artha, A. N. (2016). REKAYASA MESIN STIRLING UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA. REKAYASA MESIN STIRLING UNTUK PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA, 4(2), 147-156.

- <http://rekayasamesin.ub.ac.id/index.php/rm/article/view/193>
- [22] Singh, U. R., & Kumar, A. (2018). Review on solar Stirling engine: Development and performance. *Thermal science and engineering progress*, 8, 244-256. doi:10.1016/j.tsep.2018.08.016
- [23] Setiawan, V. N. (2022, 11 28). *Lapor Pak Jokowi, 4.400 Desa RI Belum Teraliri Listrik!* Retrieved from cnbcindonesia.com: <https://www.cnbcindonesia.com/news/20221128150739-4-391844/lapor-pak-jokowi-4400-desari-belum-teraliri-listrik>
- [24] Soetedjo, A., Nakhoda, Y. I., Lomi, A., & Suryanto, T. A. (2016). Solar Simulator Using Halogen Lamp for PV Research. In F. Pasila, Y. Tanoto, R. Lim, M. Santoso, & N. D. Pah (Ed.), *Proceedings of Second International Conference on Electrical Systems, Technology and Information 2015 (ICESTI 2015)* (pp. 239-245). Bali: Springer Singapore. doi:10.1007/978-981-287-988-2_25
- [25] Topgül, T., Okur, M., Şahin, F., & Çınar, C. (2022). Experimental investigation of the effects of hot-end and cold-end connection on the performance of a gamma type Stirling engine. *Engineering Science and Technology an International Journal*, 36, 101152-101158. doi:10.1016/j.jestch.2022.101152
- [26] Yao, L. S., & Abdul Wahab, H. (2020). Design a Solar Powered Stirling Engine Prototype to Produce Electricity. *JSE Journal of Science and Engineering*, 1(1), 30–37. <https://doi.org/10.30650/jse.v1i1.523>
- [27] Yaqi, L., Yaling, H., & Weiwei, W. (2011). Optimization of solar-powered Stirling heat engine with finite-time thermodynamics. *Renewable Energy*, 36(1), 421–427. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.037>
- [28] Zayed, M. E., Zhao, J., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Zhong, S., & Kabeel, A. E. (2021). Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/Stirling system. *Process Safety and Environmental Protection*, 146, 276–291. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.09.007>
- [29] Zayed, M. E., Zhao, J., Li, W., Elsheikh, A. H., Zhao, Z., Khalil, A., & Li, H. (2020). Performance prediction and techno-economic analysis of solar dish/stirling system for electricity generation. *Applied Thermal Engineering*, 164(September 2019), 114427. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114427>
- [30] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An Engineering Approach*. New York: McGraw-Hill Education.
- [31] Struchtrup, H. (2014). *Thermodynamics and Energy Conversion*. Victoria: Springer.
- [32] Nazemi, S. D., & Boroushaki, M. (2016). Design, Analysis and Optimization of a Solar Dish/Stirling System. *Int. Journal of Renewable Energy Development* 5, 33-42.
- [33] Çınar, C., Aksoy, F., Solmaz, H., Yılmaz, E., & Uyumaz, A. (2018). Manufacturing and testing of an alpha-type Stirling engine. *Applied Thermal Engineering*, 1373-1379.
- [34] Dai, D. D., & dkk. (2018). Imperfect regeneration analysis of Stirling engine caused by temperature differences in regenerator. *Energy Conversion and Management*, 60-69.