



Kajian analitis pembangkit tenaga menggunakan mesin Stirling terintegrasi dengan insinerator biomassa

Janter P. Simanjuntak^{1,*}), Bisrul H. Tambunan²⁾

^{1,*}) Program Studi Pendidikan Teknik Mesin, Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Univeritas Negeri Medan, Indonesia

²⁾Program Studi Pendidikan Teknik Otomotif, Jurusan Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Univeritas Negeri Medan, Indonesia

Corresponding author e-mail: janterps@unimed.ac.id

Abstrak

Kombinasi antara reaktor pembangkit energi panas dari sumber energi terbarukan dan mesin pembangkit tenaga menggunakan mesin Stirling atau disebut *cogeneration* menjadi sebuah teknologi yang menjanjikan dalam menjawab tantangan penyediaan energi masa depan dari sumber energi terbarukan khususnya sumber energi dari biomassa. Tujuan artikel ini adalah memberikan review secara teoritis dan analitis bagaimana sebuah mesin Stirling yang terintegrasi dengan reaktor pembakaran biomassa mampu menghasilkan tenaga. Artikel ini juga bertujuan untuk memberi pemahaman yang lebih mendalam kepada mahasiswa yang sedang mempelajari mata kuliah khususnya terkait konversi energi termal. Banyak mesin-mesin termal yang dibicarakan dalam ruang kelas perkuliahan, namun itu semuanya secara sendiri-sendiri. Namun di dunia industri yang menggunakan mesin-mesin termal bahwa sistem termal tentunya adalah gabungan dari mesin-mesin termal yang bekerja secara bersama-sama. Implementasi rumus-rumus dasar, asumsi-asumsi yang digunakan untuk menganalisis suatu peralatan teknik yang melibatkan suhu, tekanan, dan aliran yang berkaitan dengan mesin termal lain dalam satu sistem akan membuat pemahaman para mahasiswa akan semakin baik dan mantap.

Kata Kunci: Biomassa; Insinerator; Energi termal; Mesin Stirling

Abstract

The combination of a thermal energy generator from renewable energy sources and a power plant system using a Stirling engine which named cogeneration is a promising technology to answer the challenges of providing future energy from renewable energy sources, especially energy from biomass. The purpose of this article is to provide a theoretical and analytical review of how the Stirling engine which integrated with the biomass combustion reactor can generate power. This article also aims to provide a deeper understanding to the students who are studying subjects specifically related to thermal energy conversion. Many thermal equipment is discussed during classrooms, but all of them are individually discussed. However, in the industrial that uses thermal equipment's, the thermal system power plant is certainly a combination of them that working together. Implementation of basic equations, assumptions that used to analyse that equipment involving temperature, pressure, and flow associated with other thermal equipment in one system will make the students' understanding better and more better.

Keywords: biomass; incinerator; thermal energy, Stirling engine.

PENDAHULUAN

Untuk menjawab tantangan ketersediaan energi dimasa mendatang, maka dilakukan usaha dan upaya untuk mencari sumber energi alternative dan mengkonversinya menjadi energi yang dapat digunakan. Salah satu sumber energi dimasa depan yang dapat diandalkan dan sifatnya dapat diperbarui adalah biomassa [1]. Beberapa teknologi konversi biomassa sedang berkembang dengan pesat. Selain teknik gasifikasi (*gasification*), maka teknik pembakaran (*combustion*) juga menjadi salah satu cara yang sangat diunggulkan dalam mengonversi biomassa menjadi sumber energi yang siap pakai.

Memang teknik gasifikasi dikenal mampu meningkatkan nilai pembakaran atau *heating value* (HV). Beberapa reactor sudah diuji coba, termasuk jenis *fluidized bed* yang memiliki keunggulan dibanding dengan reactor *fixed bed*. Kinerja reactor *fluidized bed* juga sudah ditingkatkan dengan modifikasi pada ruang bakar. Dengan membuat dua buah silinder konsentris yang terkoneksi secara internal dimana material *inert* pembawa energi panas hasil pembakaran dari ruang pembakaran biomassa/*biomass combustion chamber* yang biasanya menggunakan pasir (*sand*). Pasir dapat bersirkulasi dari ruang bakar ke ruang gasifikasi dan sebaliknya. Panas hasil pembakaran digunakan sebagai energi untuk ruang gasifikasi sebab proses gasifikasi adalah proses tanpa oksigen, jadi hanya membutuhkan energi termal yang harus disuplai dari luar. Simanjuntak, dkk (2015) berhasil mendapatkan nilai pembakaran biomassa jenis serbuk kayu sebesar 7 MJ/m³ dengan menggunakan reaktor *fluidized bed* jenis sirkulasi internal [2]. Nilai CV dari biomassa sebesar ini sudah lebih dari cukup untuk digunakan sebagai bahan bakar pada mesin-mesin pembakaran dalam, motor bensin ataupun diesel [3] dan mesin pembakaran luar seperti turbin gas [4, 5]. Namun teknik gasifikasi ini mempunyai kelemahan dalam hal perlakuan atau *treatment* biomassa sebagai bahan bakar.

Berbeda dengan teknik gasifikasi, pembakaran memiliki fleksibilitas yang tinggi, dimana semua jenis biomassa dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam dengan perlakuan awal yang jauh lebih sederhana. Dalam kajian pembakaran beberapa jenis biomassa dengan menggunakan tungku sederhana, Simanjuntak,

dkk (2017) juga berhasil mendapatkan suhu gas panas produk pembakaran (*flue gas*) sebesar 600–750 °C [6]. Suhu setinggi ini memberi indikasi bahwa gas panas hasil pembakaran biomassa memiliki energi termal yang tinggi.

Mesin Stirling (MS) termasuk salah satu alat yang berpotensi digunakan untuk mengonversi energi panas hasil pembakaran biomassa untuk menghasilkan tenaga (*power*) dengan efisiensi listrik sebesar 10–25 % [7]. MS termasuk mesin pembakaran luar namun pemasukan energi termal kedalam silinder adalah dengan cara perpindahan kalor secara konduksi. MS memiliki konstruksi yang sederhana, mudah dioperasikan, dapat digunakan dimana saja, serta dapat menggunakan berbagai sumber energi termasuk sumber energi terbarukan dari biomassa.

Kombinasi antara reaktor pembangkit energi panas dari biomassa dan mesin pembangkit tenaga MS atau disebut *cogeneration* boleh menjadi sebuah teknologi yang menjanjikan dalam menjawab tantangan penyediaan energi masa depan dari sumber energi terbarukan. Namun MS memiliki kelemahan pada system pendinginnya. Efisiensi MS sangat tergantung pada konsistensi sumber panas dan metode pendinginan. Tetapi modifikasi pada MS menjanjikan dalam hal peningkatan efisiensi.

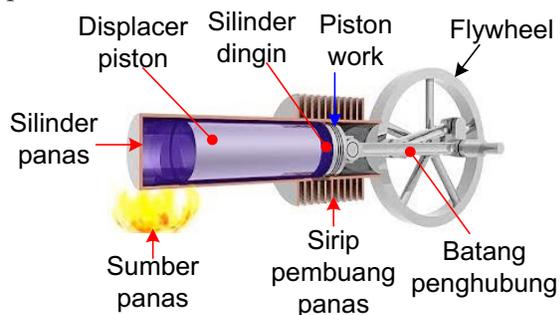
Beberapa kajian dilakukan untuk penggunaan gas panas produk pembakaran biomassa sebagai fluida kerja pada MS. Namun penggunaan secara langsung memiliki kelemahan pada konsistensi dan kualitas gas panas hasil pembakaran biomassa. Kandungan partikel dalam gas panas mempengaruhi transfer panas ke silinder MS sehingga mengurangi efisiensi [8, 9]. Selain penggunaan secara langsung, energi panas juga dapat di simpan untuk digunakan disaat yang perlu.

KAJIAN LITERATUR

Biomassa dan bahan bakar padat lainnya termasuk sampah organik adalah sumber energi yang dapat diperbarui. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengonversi sumber energi tersebut adalah dengan metode termokimia, yaitu proses dengan suhu tinggi, yaitu dengan cara pembakaran (*combustion*) [10]. Energi panas yang dihasilkan dapat digunakan secara langsung seperti untuk pemanasan (*heating*),

penggerak mula (*primeover*), ataupun disimpan (*storage*). Simanjuntak, dkk (2021) merancang secara teoritis sistem penyimpan energi panas dari gas panas hasil pembakaran sampah rumah tangga. Berdasarkan kajian parametris yang mereka lakukan bahwa dengan memanfaatkan fenomena *thermocline*, tangki penyimpanan dengan medium air sangat berpotensi dalam menyimpan energi termal untuk waktu yang lama yang dapat digunakan untuk keperluan air panas keluarga [11].

Secara termal MS bekerja memanfaatkan energi panas sebagai sumber tenaga, sumbernya bisa darimana saja, termasuk energi panas hasil pembakaran biomassa. Umumnya MS sederhana mempunyai 2 bagian ruang yang dibatasi oleh piston *displacer* dan piston kerja yang terhubung dengan batang penghubung pada satu titik. Kedua ruang tersebut berfungsi sebagai ruang sisi-panas (SP) dan ruang sisi-dingin (SD). Secara diagram, MS sederhana seperti ditunjukkan pada Gbr. 1 berikut ini.



Gambar 1. Prinsip dasar kerja Mesin Stirling

Ketika fluida kerja (FK) biasanya udara, helium didalam SP mendapat energi panas, maka tekanan pada SP naik drastis menyebabkan piston *displacer* terdorong hingga sampai pada ruang SD mengakibatkan tekanan didalam SP meningkat dan mendorong piston kerja sehingga menghasilkan kerja. Langkah berikut piston *displacer* naik kembali menuju titik mati atasnya (TMA) dan mendorong semua fluida kerja yang panas menuju SD untuk kemudian mendapatkan proses pendinginan. Pada saat yang sama bahwa piston SD kembali bergerak menuju TMA-nya dan mendorong semua fluida dingin menuju SP. Demikian proses terjadi berulang-ulang sehingga diperoleh energi mekanik translasi yang diubah menjadi energi mekanik berupa putaran pada poros engkol MS.

Untuk meningkatkan proses pendinginan pada SD biasanya ditambahkan sirip-sirip

(*fins*) untuk meningkatkan perpindahan panas. Biasanya SD berhubungan langsung dengan kondisi udara luar untuk membuang panas, namun cara seperti ini tidak dapat menghasilkan efisiensi MS yang tinggi. Oleh karena itu, untuk pembangkitan dengan daya dengan kapasitas sedang sampai yang besar harus menggunakan alat pendingin (*radiator*) agar perbedaan suhu dapat meningkat tinggi.

Tujuan pendinginan adalah untuk menurunkan suhu FK sehingga tekanan didalam SD menjadi turun mengakibatkan piston dapat bergerak dengan mudah untuk melakukan kompresi terhadap FK. MS bekerja berdasarkan perbedaan suhu (ΔT) antara kedua silinder. Semakin tinggi perbedaan suhu, maka efisiensi mesin akan semakin tinggi.

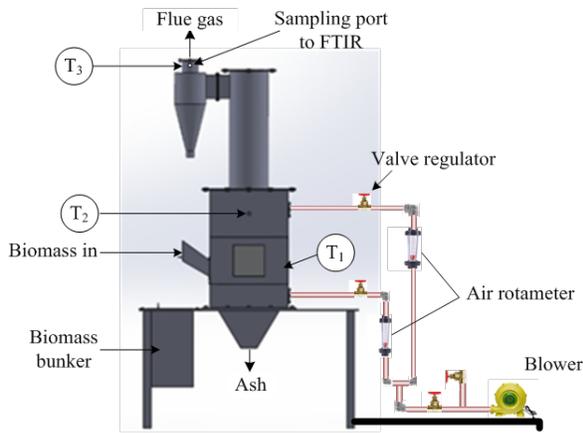
Tujuan kajian ini adalah mengevaluasi kinerja MS yang terintegrasi dengan reaktor pembakaran biomassa. Energi panas hasil pembakaran digunakan sebagai energi untuk pemanas (*heater*) bagi FK. Artikel ini juga bertujuan untuk memberi pemahaman yang lebih mendalam kepada mahasiswa yang sedang mempelajari mata kuliah khususnya terkait konversi energi termal. Implementasi rumus-rumus dasar, asumsi-asumsi yang digunakan untuk menganalisis suatu peralatan teknik yang melibatkan suhu, tekanan, dan aliran membuat pemahaman para mahasiswa akan semakin baik dan mantap.

DESAIN TEORITIS

Untuk mewujudkan rencana dan pengembangan sistem pembangkit tenaga berbasis biomassa ini, berikut adalah deskripsi peralatan-peralatan yang harus dimiliki dan peralatan lain yang dimungkinkan untuk meningkatkan kinerja sistem.

1. Reaktor pembakaran biomassa

Reaktor pembakaran (*Insinerator*) berfungsi untuk menghasilkan energi termal dengan biomassa sebagai bahan bakar. *Incinerator* jenis fixed bed menjadi yang paling cocok digunakan dalam menghasilkan gas panas. Reaktor ini menghasilkan sedikit partikel pembakaran dibandingkan dengan fluidized bed. Prototipe *incinerator* pembangkit energi panas seperti ditunjukkan pada Gbr. 2 berikut:



Gambar 2. Incinerator tipe fixed-bed

Biomassa sebagai umpan (*feedstock*) yang disimpan dalam bunker dimasukkan kedalam ruang bakar (*combustion chamber*) dan udara pembakaran diatur melalui katub regulator dan diukur menggunakan rotameter udara. Untuk pembakaran sempurna dengan rasio udara-bahan-bakar (A/F) yang tepat akan menghasilkan energi panas yang tinggi pada gas buang hasil pembakaran (*flue gas*) yang dapat diketahui melalui suhu gas buang (T_3). Suhu ruang bakar dikontrol melalui termokopel T_1 dan T_2 . Gas produk pembakaran harus dievaluasi karena tidak boleh mengandung pollutant. Sampel gas buang harus diuji menggunakan FTIR untuk mengetahui kandungan gas buang.

Sebelum dialirkan menuju APK yang terdiri dari alat pemanas (*heater*), alat pendingin (*cooler*), dan *regenerator*, terlebih dahulu gas panas dibersihkan menggunakan siklon (*cyclone separator*) untuk meningkatkan kualitas gas panas sebelum digunakan sebagai pemanas pada MS.

Untuk sejumlah massa bahan bakar biomassa tiap satuan waktu operasional, maka besarnya energi gas panas yang terkandung pada *flue gas* \dot{Q}_{gp} yang dihasilkan oleh *incinerator* dapat diketahui melalui persamaan (1) berikut

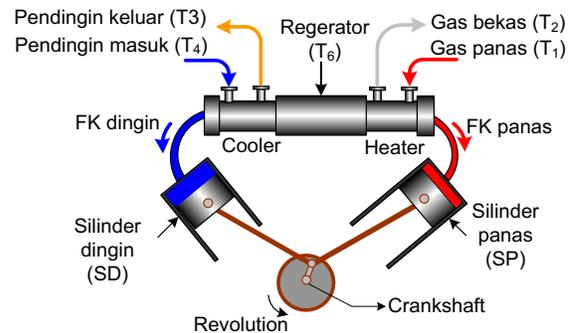
$$\dot{Q}_{gp} = \dot{m}_{bb} * LHV_{bb} * \eta_{ins} \text{ (kW)} \quad (1)$$

Dimana \dot{m}_{bb} adalah konsumsi bahan bakar biomassa tiap satuan waktu (kg/jam), LHV_{bb} adalah nilai bakar biomassa atau sering disebut *heating value* (MJ/m³), dan η_{ins} adalah efisiensi *incinerator*.

2. Mesin Stirling

Untuk dikombinasikan dengan *incinerator*, maka MS yang digunakan adalah tipe alpha

seperti ditunjukkan pada Gbr. 3. Satu silinder sebagai penerima energi panas atau SP dan yang lainnya merupakan silinder pendingin atau SD. FK yang digunakan adalah udara bertekanan yang sudah diatur sebelumnya sebagai tekanan kerja MS. Untuk referensi bahwa tekanan MS yang sudah pernah diuji adalah seperti yang dilakukan oleh Kropiwnicki, dkk (2020) [12].



Gambar 3. Diagram kerja mesin Stirling tipe alpha

Cara kerja mesin adalah seperti deskripsi berikut. Piston pada SD bertugas melakukan kompresi terhadap FK menuju SP melalui APK dan pada saat yang sama FK menerima energi panas dari *incinerator* pada alat pemanas sehingga suhu dan tekanan FK semakin meningkat mengakibatkan piston pada SP terdorong dan menghasilkan kerja (*work*). Proses berikutnya yaitu piston pada SD melakukan ekspansi atau dekompresi dengan menarik kembali fluida kerja panas dari SP dan mengalami pendinginan di alat pendingin sebelum masuk kedalam SD. Jadi fungsi utama dari piston SD adalah melakukan kompresi dan dekompresi sedangkan piston SP bertanggung jawab pada produksi kerja. Demikian seterusnya dengan proses yang continue sehingga menghasilkan kerja mekanik berupa kerja bersih (W_{net}) pada poros MS. Kerja bersih yang dihasilkan oleh MS dalam satu siklus dapat diketahui dari balans energi berikut

$$\dot{Q}_{masuk} = \dot{m}_{fk} C_{p, fk} (T_1 - T_2) \quad (2)$$

Atau besarnya kalor yang diserap oleh FK pada alat pemanas dapat juga dituliskan sebagai berikut

$$\dot{Q}_{masuk} = \dot{Q}_{gp} = \dot{m}_{fk} C_{p, fk} (T_1 - T_2) \quad (3)$$

Dimana \dot{Q}_{masuk} adalah besarnya energi panas yang diserap oleh FK pada alat pemanas yang dapat diketahui dari suhu terukur pada T_1 dan T_2 , sedangkan \dot{Q}_{keluar} adalah energi termal yang dibuang oleh alat pendingin yang dapat diketahui dari suhu terukur pada T_3 dan T_4 yaitu:

$$\dot{Q}_{keluar} = \dot{m}_{fk} C_{p,fk} (T_3 - T_4) \quad (4)$$

Dimana \dot{m} adalah laju aliran massa, C_p adalah kapasitas panas, dan T menyatakan suhu. Subskrip f_k menyatakan fluida kerja, m dan k masing-masing menyatakan sisi masuk dan keluar alat pemanas.

Efisiensi termal η_{th} MS dapat ditentukan sebagai berikut,

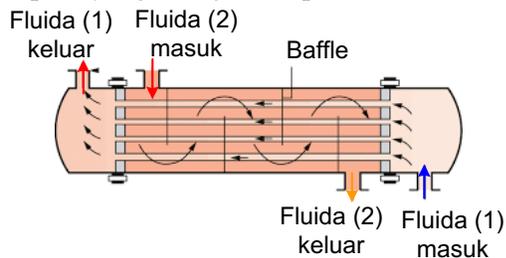
$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{masuk}} \quad (5)$$

Dimana kerja bersih MS secara termal adalah:

$$\dot{W}_{net} = \dot{Q}_{masuk} - \dot{Q}_{keluar} \quad (6)$$

3. Alat Penukar Kalor (APK)

Sistem penukar kalor (APK) memiliki macam jenis dan geometri sesuai maksud dan tujuan penggunaannya. Umumnya APK digunakan sebagai alat pemanas (*heating*), alat pendinginan (*cooling*), ataupun alat untuk menyimpan energi termal (*regenerator*). Dalam artikel ini APK tipe cangkang dan pipa (*shell and tube*) sangat direkomendasikan untuk dikembangkan pada instalasi pembangkit tenaga berbasis biomassa, mengingat fleksibilitas dan efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan APK yang lain. Profil APK yang akan dikembangkan adalah seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 4 berikut.



Gambar 4. APK tipe pipa ganda

Biasanya sebelum melakukan pemilihan APK terlebih dahulu dilakukan kajian termal secara analitis untuk menentukan ukuran APK yang dibutuhkan. Komponen APK yang dibutuhkan adalah:

a. Pemanas (*heater*)

Berdasarkan prinsip kerja MS yang memanfaatkan energi termal untuk memanaskan sejumlah massa FK sehingga mengalami peningkatan suhu dan tekanan pada alat pemanas dan SP. Alat pemanas harus direncanakan dengan benar dimana akan terjadi perindahan panas dari gas panas hasil pembakaran ke FK, yaitu penukar kalor gas-gas. Indikator alat pemanas ini adalah dihasilkannya suhu FK yang tinggi sebelum masuk SP. Sebuah alat pemanas yang efektif dan dapat melayani perpindahan panas dengan baik pada situasi dimana aliran FK didalam alat pemanas sangat tinggi.

b. Pendingin (*cooler*)

Sama halnya dengan alat pemanas, FK yang akan menuju SD harus sesegera mungkin di dinginkan. Kondisi ini akan sangat membantu proses pemvakuman atau dekompresi yang dilakukan oleh piston SD. Alat pendingin harus didesain dengan penuh pertimbangan termal dan teknik. Efektivitas alat pendingin menjadi hal yang sangat diutamakan. Khusus perpindahan kalor pada alat pendingin, kemungkinan jenis APK yang digunakan adalah jenis penukar kalor cair-gas.

Tergantung kegunaannya, maka untuk menebak ukuran awal APK, baik luas permukaan maupun panjang pemindah panas yang dibutuhkan untuk tipe pipa ganda, maka dilakukan analisis termal menggunakan korelasi-korelasi dasar maupun korelasi empiris berikut ini,

$$A_s = \frac{\dot{Q}_{gp}}{UF\Delta T_{LMTD}} \quad (7)$$

Untuk APK dengan spesifikasi teknik yang sudah diketahui atau dapat ditentukan, maka analisis dapat dilakukan dengan pendekatan beda suhu rata-rata atau metode LMTD (*log mean temperature difference*) seperti pada persamaan (8)

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(\Delta T_1) - (\Delta T_2)}{\ln \frac{(\Delta T_1)}{(\Delta T_2)}} \quad (8)$$

Dimana ΔT tergantung kepada aliran; aliran fluida panas dan dingin serta jenis aliran: sejajar atau berlawanan. Koefisien perpindahan panas total (U) dapat ditentukan berdasarkan koefisien perpindahan kalor konveksi (h) dari pipa dan cangkang seperti persamaan (9) berikut:

$$\frac{1}{U} = \left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right) \quad (9)$$

Untuk menentukan besaran h_i dan h_o digunakan korelasi-korelasi empiris yang terkait dengan jenis dan tipe aliran yang diketahui melalui bilangan Reynolds dan Nusselt, yaitu:

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \quad (10)$$

$$Nu = \frac{h \times d}{k} \quad (11)$$

Dimana h adalah koefisien perpindahan kalor konveksi di sisi cangkang atau di sisi pipa, d adalah karakteristik panjang pipa, V adalah kecepatan aliran, dan ρ, μ, k adalah karakteristik fluida yang dianalisis pada suhu film. Bilangan Nusselt sangat tergantung kepada jenis fluida kerja dan tipe aliran di dalam APK (laminer atau turbulen).

Setelah luas penampang perpindahan panas dapat di prediksi, maka ukuran-ukuran APK dapat ditentukan dengan menggunakan hubungan pada persamaan (12) berikut.

$$A_s = N\pi DL \quad (12)$$

c. Regenerator

Regenerator berfungsi untuk menyimpan energi termal. Pada langkah ekspansi piston SD, maka FK dari SP ditarik bersamaan dengan naiknya piston SP menuju TMA. Pada keadaan ini FK yang ditarik masih memiliki energi termal yang tinggi. Sebelum memasuki daerah pendinginan, maka energi tersebut terlebih dahulu dijebak/*trapping* untuk disimpan menggunakan dengan maksud bahwa energi termal tersebut akan digunakan kembali oleh FK ketika proses kompresi FK menuju daerah pemanasan. Penggunaan *regerator* sudah terbukti dapat menaikkan efisiensi termal dan daya keluaran MS [13]. Biasanya penukar kalor yang digunakan sebagai *regerator* adalah dari tipe penukar kalor kompak atau *compact heat exchanger* dengan rasio luas permukaan pemindah panas dengan volumenya atau disebut dengan *area density* ($\beta > 700 \text{ m}^2/\text{m}^3$) [14].

KESIMPULAN

Mesin Stirling berpotensi menjadi alat yang sangat penting dalam menghasilkan energi dalam bentuk kerja (*work*) dengan mengubah energi panas dari sumber manapun,

termasuk panas pembakaran biomassa. Mesin ini memiliki keunggulan dalam hal kapasitas ataupun output tenaga yang dihasilkan. Keunggulan lain bahwa mesin ini dapat digunakan didaerah mana saja dan tidak terbatas pada sumber energi panas. Selain itu mesin ini juga dapat dibuat untuk kapasitas kecil hingga kapasitas besar.

RENCANA KEDEPAN

1. Melakukan simulasi secara analitis dengan memanfaatkan big data. Melalui penelusuran data digital, maka hubungan-hubungan parametris yang telah dituliskan dapat diuji
2. Perlu melakukan desain dan perencanaan alat pemanas untuk digunakan pada mesin Stirling
3. Perlu melakukan desain dan perencanaan alat pendingin untuk digunakan pada mesin Stirling
4. Perlu kajian terhadap penukar kalor yang diperlukan sebagai regenerator untuk digunakan pada mesin Stirling

REFERENSI

1. Popa, V.I. and I. Volf, Biomass as renewable raw material to obtain bioproducts of high-tech value. 2018: Elsevier.
2. Simanjuntak, J.P. and Z. Zainal, Experimental study and characterization of a two-compartment cylindrical internally circulating fluidized bed gasifier. Biomass and Bioenergy, 2015. 77: p. 147-154.
3. Simanjuntak, J.P., E. Daryanto, and B.H. Tambunan. Producer gas production of Indonesian biomass in fixed-bed downdraft gasifier as an alternative fuels for internal combustion engines. in Journal of Physics: Conference Series. 2018: IOP Publishing.
4. Sadig, H., S.A. Sulaiman, and M.A. Said, Effect of producer gas staged combustion on the performance and emissions of a single shaft micro-gas turbine running in a dual fuel mode. Journal of the Energy Institute, 2017. 90(1): p. 132-144.
5. Al-attab, K.A. and Z.A. Zainal, Performance of a biomass fueled two-stage micro gas turbine (MGT) system with hot air production heat recovery unit.

- Applied Thermal Engineering, 2014. **70**(1): p. 61-70.
6. Simanjuntak, J.P. and B.H. Tambunan, Kajian eksperimental kemampuan bahan bakar biomassa menggunakan tungku penggas. 2018.
 7. Badea, N., Design for micro-combined cooling, heating and power systems: Stirling engines and renewable power systems. 2014: Springer.
 8. Ferreira, A.C., et al., Assessment of the Stirling engine performance comparing two renewable energy sources: Solar energy and biomass. Renewable Energy, 2020. **154**: p. 581-597.
 9. Schneider, T., D. Müller, and J. Karl, A review of thermochemical biomass conversion combined with Stirling engines for the small-scale cogeneration of heat and power. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020. **134**: p. 110288.
 10. Basu, P., Biomass gasification, pyrolysis and torrefaction: practical design and theory. 2018: Academic press.
 11. Simanjuntak, J.P., et al., Thermal Energy Storage System from Household Wastes Combustion: System Design and Parameter Study. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2021. **80**(2): p. 115-126.
 12. Kropiwnicki, J. and M. Furmanek, A Theoretical and Experimental Study of Moderate Temperature Alfa Type Stirling Engines. Energies, 2020. **13**(7): p. 1622.
 13. Kropiwnicki, J., Application of Stirling engine type alpha powered by the recovery energy on vessels. Polish Maritime Research, 2020. **27**(1): p. 96-106.
 14. Cengel, Y., Heat and mass transfer: fundamentals and applications. 2014: McGraw-Hill Higher Education.