

PENGEMBANGAN *STIRLING ENGINE* TIPE PISTON BEBAS UNTUK APLIKASI *CONCENTRATED SOLAR POWER (CSP)*

**Dwi Rahmalina^{1*}, I Gede Eka Lesmana², Agri Suwandi², Reza A. Rahman²,
Fikhi S. Ramadhan², Kevin A. Sugiyanto²**

¹Program Studi Magister Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta, 12640

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta, 12640

*Email: drahmalina@univpancasila.ac.id

Diterima: 18 Oktober 2020

Direvisi: 27 November 2020

Disetujui: 18 Desember 2020

ABSTRAK

Mesin stirling merupakan mesin kalor yang mempunyai cara kerja mengkompresi dan mengekspansi fluida pada suhu yang berbeda yang umumnya menyebabkan terjadinya perubahan energi panas menjadi energi mekanik. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui nilai efisiensi thermal pada mesin stirling, efektivitas pada regenerator, laju perpindahan panas pada *heater*, kerugian panas yang terjadi pada regenerator, desain rancangan alat mesin stirling serta simulasi dari *heater* dan regenerator mesin stirling tipe beta yang menggunakan piston bebas. Simulasi dilakukan menggunakan software Ansys pada heater dan regenerator yang terkena paparan fluida cair (Therminol VP-1) dan gas (Helium). Didapatkan nilai dari perhitungan simulasi untuk laju perpindahan panasnya pada heater yakni 216,22 Watt, kerugian panas pada regeneratornya yakni 131,83 Joule, efektivitas dan efisiensinya yaitu 6,1% dan 40%. Metode yang digunakan untuk perancangan mesin stirling tipe free piston ini yaitu metode Pahl & Beitz, dimana metode perancangan ini dapat melihat kebutuhan industri saat ini, dengan perancangan yang dilakukan secara efektif dapat meningkatkan kreatifitas dan metode ini banyak digunakan pada skala industri.

Kata kunci : *Konsentrasi tenaga surya, mesin stirling, piston bebas, temperatur, pegas flexure*

ABSTRACT

The stirling engine is a heat engine that has a way of compressing and expanding the fluid at different temperatures which generally causes a change in heat energy to mechanical energy. This study aims to determine the value of the thermal efficiency of the stirling engine, effectiveness at the regenerator, the heat transfer rate of the heater, the losses that occur in the regenerator, the design of the stirling engine, and the simulation of the heater tube and regenerator stirling engine using a free piston variation. Simulations were carried out using Ansys software on heaters and regenerators exposed to liquid fluid (Therminol VP-1) and gas (Helium). The value obtained from the simulation is 216.22 Watt, the heat loss in the regenerator is 131.83 Joule, which has an efficiency and efficiency of 6.1% and 40%. This method used for the design of this free piston type stirling engine is the Pahl & Beitz method, where this design method can see the needs of today's industry, with a design that is carried out effectively can increase creativity and this method is widely used on an industrial scale.

Keywords : *concentrating solar power, stirling engine, free piston, temperature, flexure spring*

PENDAHULUAN

Concentrated solar power (CSP) merupakan sistem yang menggunakan radiasi matahari yang terkonsentrasi untuk menghasilkan panas yang dapat menghasilkan listrik di Indonesia teknologi *concentrated solar power* (CSP) belum terlalu populer. Kegunaan teknologi *concentrated solar power* dapat menghasilkan listrik dan dapat disebut juga termoelektrik surya biasanya dihasilkan melalui uap, cahaya yang didapat dari matahari bisa digunakan sebagai sumber panas untuk daya konvensional.

Mesin *stirling* merupakan mesin kalor yang mempunyai cara kerja mengkompresi dan mengekspansi fluida pada suhu yang berbeda yang menyebabkan terjadinya perubahan energi panas menjadi energi mekanik. Listrik dapat dihasilkan ketika fluida panas yang masuk ke dalam mesin *stirling* menggerakkan komponen penggerak mesin *stirling* (*displacer* dan *piston*) yang tersambung ke sebuah generator. Mesin *stirling* memiliki tiga tipe, antara lain mesin *stirling* tipe *alpha*, mesin *stirling* tipe *beta*, dan mesin *stirling* tipe *gamma*.

Pada dasarnya mesin *stirling* tipe *free piston* ini hampir sama dengan mesin *stirling* pada umumnya. Hanya saja, mesin *stirling* tipe ini tidak memakai *flywheel* dengan *crankshaft* sebagai mekanisme penggerak pistonnya. Keuntungan dari ketidakhadirannya *crankshaft* dan *flywheel* di mesin ini yakni berupa struktur mekanik yang simpel dan compact tetapi menghasilkan daya densitas yang besar. Pengoperasian mesin ini juga menggunakan variabel rasio kompresi.

Hal ini memungkinkan menggunakan bahan bakar bensin konvensional atau bahan bakar alternatif seperti hidrogen yang dapat mendukung pengurangan emisi tanpa memodifikasi komponen utama. Karena dihilangkannya mekanisme penggerak *crankshaft*, maka tidak ada gaya tekan ke samping antara piston daya dan dinding silinder, dan karena lebih sedikit bagian bergerak yang ada di mesin ini, kerugian gesekan juga menjadi lebih rendah dari yang biasanya.

Beberapa keuntungan yang terdapat pada mesin *stirling* tipe *free piston* dibanding dengan mesin *stirling* pada umumnya adalah efisiensi termal dan fleksibilitas bahan bakar yang tinggi, minim getaran dan minim kebisingan, minimnya emisi bahan bakar dan biaya investasinya lebih sedikit dibanding dengan mesin *stirling* pada umumnya karena beberapa komponen tidak dipakai, seperti *crankshaft* atau *flywheel*.

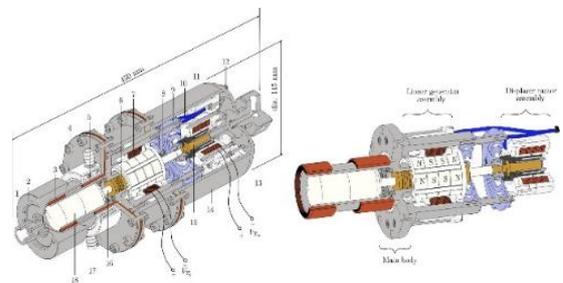
Pengembangan mesin *stirling* tipe *free piston* sendiri akhir-akhir ini menarik perhatian para ilmuwan sebagai energi baru terbarukan yang sangat menjanjikan dikarenakan keuntungannya yang sangat menarik. Keuntungan-keuntungan inilah yang membuat para ilmuwan dan peneliti menjadikan mesin *stirling free piston* ini digunakan

dalam pengaplikasian pembangkit listrik terutama dalam proses *maintenance* nya menjadi perhatian tinggi seperti dalam misi luar angkasa dan generator tenaga surya.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan hasil simulasi menggunakan bantuan dari *software* Ansys, dan perancangan yang menggunakan *software* Solidwork 2018. Pada proses perancangan *stirling engine* tipe *free piston* untuk aplikasi alat *Concentrated Solar Power* (CSP) dengan menggunakan metode perancangan Pahl & Beitz. Mesin *stirling* tipe *free piston* ini menggunakan fluida *therminol VP-1* yang dipanaskan dengan energi panas dari matahari yang dipusatkan oleh parabola.

Tahap awal perancangan dimulai dengan identifikasi kebutuhan yaitu mengumpulkan informasi atau data yang diperlukan dari pembuatan *stirling engine* ini. Lalu dilanjutkan dengan perencanaan konsep produk dimana bertujuan untuk menunjukkan hubungan antara *input* dan *output* yang umumnya berupa aliran energi, material, dan sinyal. Selanjutnya yaitu dilakukanlah perencanaan bentuk produk yang bertujuan untuk menjabarkan pemikiran menjadi varian-varian desain dengan dilakukannya analisis desain untuk mengetahui apakah desain rancangan sudah sesuai kebutuhan atau tidak. Desain mesin *stirling* tipe *free piston* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Mesin *stirling* tipe *free piston*

Terakhir ialah perancangan detail yang mencakup dimensi, spesifikasi, dan *Bill Of Material* (BOM). Setelah membuat perancangan alat, selanjutnya ialah mensimulasi dan menganalisis alat yang dibangun menggunakan *software* Ansys untuk mengetahui secara langsung fenomena yang terjadi pada alat tersebut jika digunakan dalam skala laboratorium

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Prosedur kerja mesin *stirling* tipe *free piston*

Prosedur kerja mesin *stirling* dengan menggunakan inovasi piston bebas ini dimulai

ketika energi matahari yang dipancarkan dari matahari masuk ke permukaan bumi yang terdapat sebuah alat bernama *concentrating solar power* merupakan sebuah teknologi yang memanfaatkan sistem tenaga surya yang difokuskan untuk merubah energi surya yang dipanaskan. Energi yang telah diterima oleh *concentrating solar power* kemudian dipancarkan kembali menggunakan *solar collector* yang berjenis *point focus collector* bertipe *parabolic-dish* menuju sebuah tabung *receiver* yang berfungsi untuk memanaskan fluida cair kerja yaitu *therminol VP-1* atau yang biasa disebut *Biphenyl*.

Fluida cair memasuki mesin *stirling engine* menggunakan pipa yang telah terhubung dengan tabung heater. Pada tabung heater terjadi proses pemanasan yang berfungsi menggerakkan *displacer* dan piston daya untuk bergerak dengan bantuan fluida gas kerja yaitu helium bertekanan 3 bar. Listrik dapat dihasilkan ketika *displacer* dan piston daya bergerak dimana hasil gerakan tersebut akan tersambung dengan sebuah generator linier.

B. Parameter perhitungan

a) Laju perpindahan panas

Telah didapatkan nilai koefisien transfer panas menyeluruh (U) dan Log-Mean Temperature Difference ($LMTD$) pada perhitungan parameter laju perpindahan panas, yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$Q = U \cdot A \cdot LMTD$$

$$Q = 72,95 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 0,0095 \text{ m}^2 \times 312 \text{ K}$$

$$Q = 216,22 \text{ W}$$

Didapatkan laju perpindahan panas yang dihasilkan mesin *stirling* ini adalah sebesar 216,22 Watt dimana semakin besar laju perpindahan panas yang dihasilkan maka semakin tinggi temperatur pembakaran yang terjadi pada siklus mesin *stirling* ini.

b) Perhitungan kerugian panas regenerator

Kalor yang hilang pada regenerator (Q_R) dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$Q_R = (1 - \epsilon) \cdot m_R \cdot C_p (T_{h \text{ end}} - T_{c \text{ end}})$$

$$Q_R = (0,939) \times 0,45 \text{ kg} \times 5,2 \text{ J/kg.K} (60 \text{ K})$$

$$Q_R = 131,83 \text{ J}$$

Dari perhitungan, diperoleh nilai kerugian panasnya yang terjadi pada regenerator yaitu sebesar 131,83 Joule, maka kerugian panas yang dialami oleh regenerator semakin besar karena panas yang hilang pada permukaan regenerator dimana panas tersebut hilang keluar sistem.

c) Perhitungan efisiensi siklus *stirling engine*

Efisiensi dari mesin *stirling* dihitung dengan perbandingan temperatur panas dan dingin menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\eta = \left(\frac{\text{Kerja yang dilakukan}}{\text{Kalor yang disuplai}} \right)$$

$$\eta = \frac{mR \ln r (T_1 - T_2)}{mRT_1 \ln r} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \times 100\% = 1 - \frac{T_L}{T_H} \times 100\%$$

$$\eta = 1 - \frac{120}{200} = 1 - 0,6 = 0,4 \times 100\%$$

$$\eta = 40\%$$

Hasil perhitungan memperoleh efisiensi thermal sebesar 40% yang menunjukkan performanya sangat bagus untuk dijadikan alat konversi energi seperti penelitian yang dilakukan ini.

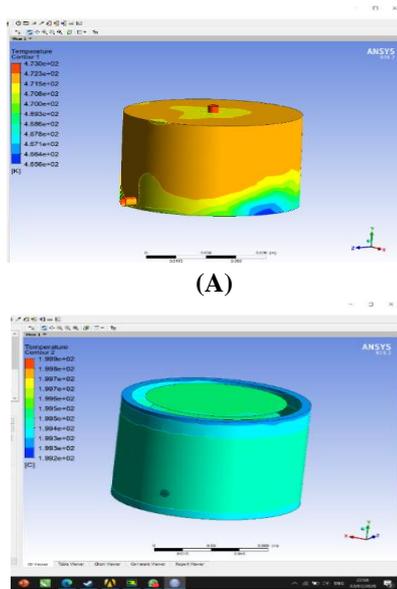
C. Hasil simulasi tabung heater

Simulasi diawali dengan proses iterasi sudah selesai, dengan pemberitahuan mengenai simulasi yang dijalankan telah selesai dengan adanya pernyataan telah konvergen seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Grafik iterasi yang sudah konvergen pada tabung heater

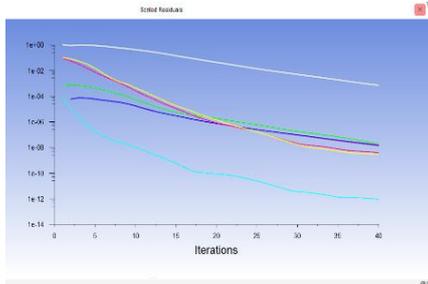
Selanjutnya dilakukan pemilihan *contour* pada bagian *geometry* isi *location* menjadi *wall_fluid_heater*, variable menjadi temperatur, *range* menjadi global. Distribusi temperatur yang terjadi saat fluida cair yang panas melewati heater terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. (A) Distribusi temperatur fluida cair pada heater; (B) distribusi temperatur pada permukaan dinding heater

d. Hasil simulasi pada regenerator

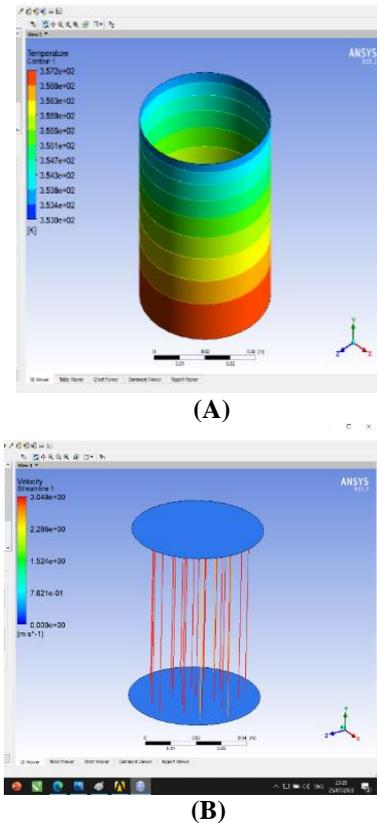
Simulasi pada generator diawal dengan proses iterasi, yang dijalankan sampai muncul pernyataan telah konvergen seperti terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik iterasi yang sudah konvergen pada regenerator

Selanjutnya pada menu utama CFD Fluent dipilih results untuk melihat hasil dari simulasinya dan pilih insert lalu *contour* untuk melihat distribusi temperatur yang terjadi pada regenerator. Untuk memunculkan hasil simulasinya, dipilih menu insert, lalu *streamline* pilih domains-nya *liquid, start from inlet, dan variable velocity*. Bisa dilihat bahwa pada *contour*, dinding regenerator mengalami kenaikan temperatur dari 353 K menjadi 357,2 K, dan kecepatan alirannya rata-rata 3,05 m/s, dapat dipastikan bahwa aliran fluida tersebut

bersifat turbulen mengingat perhitungan bilangan reynolds. Hasil dari simulasi seperti terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Hasil simulasi (A) gambar distribusi pada regenerator; (B) kecepatan aliran fluida pada regenerator

C. Perancangan Mesin

Pada proses perancangan *stirling engine* tipe *free piston* untuk aplikasi alat *Concentrated Solar Power* (CSP) dengan menggunakan metode perancangan *Pahl & Beitz*. Identifikasi kebutuhan yaitu mengumpulkan informasi atau data yang diperlukan dari pembuatan *stirling engine* ini.

Tabel 1. Kebutuhan Perancangan *Stirling Engine* Tipe *Free Piston*

No.	Kebutuhan	Tingkat kepentingan
1.	Penempatan pada <i>stirling engine</i>	★★
2.	Aman untuk dioperasikan	★★★★
4.	Komponen mudah didapatkan	★★★★
5.	Perawatan mudah	★★★★
6.	Biaya produksi murah	★★

Keterangan:



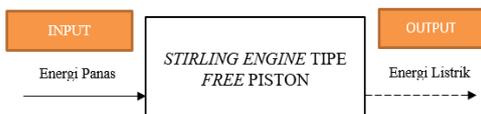
= Sangat diperlukan
 = Diperlukan
 = Perlu

Tahap selanjutnya yaitu membuat daftar spesifikasi untuk membedakan antara persyaratan sebagai keharusan (*demand*) dan sebagai keinginan (*wishes*). Pada penyusunan spesifikasi dilakukan untuk mempermudah dalam proses pemilihan seperti geometri, kinematika, material, biaya perawatan, biaya produksi.

Tabel 2. Daftar persyaratan *demand* dan *wishes*

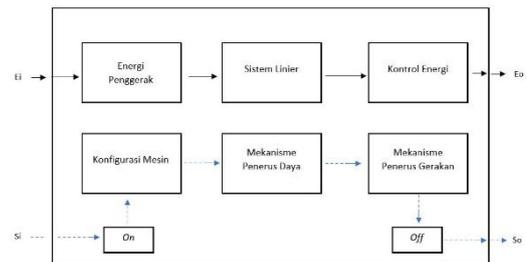
No.	Aspek	D/W
1.	Geometri Bentuk dan konstruksi kokoh	D
2.	Kinematika Mekanisme mudah dioperasikan	D
3.	Material Mudah didapatkan dipasaran	D
4.	Perakitan Waktu pemasangan dan pembongkaran relatif cepat	W
5.	- Perawatan Mudah dilakukan pembersihan pada komponen-komponen -Komponen dapat diganti atau diperbaiki -Biaya perawatan relatif murah	W D W
6.	-Aplikasi Dapat dipasarkan secara luas -Umur pemakaian yang relatif lama	D D
7.	Biaya Biaya produksi murah	W

Pada suatu perancangan diperlukan suatu blok fungsi, untuk mendapatkan *input* dan *Output* agar suatu proses perancangan dapat bekerja sesuai dengan fungsinya, seperti terlihat pada Gambar 6 dan 7.



Keterangan :
 —————> = Energi *input* dan *output*
 - - - - -> = Sinyal *in* dan *out*

Gambar 6. Blok fungsi *stirling engine* tipe *free piston*



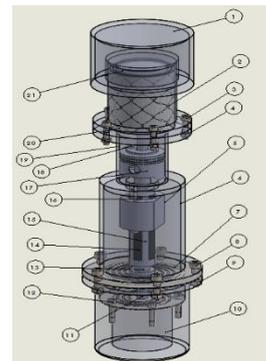
Keterangan :
 —————> = Energi *input* dan *output*
 - - - - -> = Sinyal *in* dan *out*

Gambar 7. Diagram fungsi

D. Perencanaan bentuk produk

a) Desain Terpilih

Berdasarkan dari hasil evaluasi pembobotan serta perhitungan varian maka desain terpilih yaitu varian 2 pada perancangan sebagai berikut :



Gambar 8. Varian terpilih

b) Perhitungan Perancangan

1. Menentukan silinder displacer

Perancangan material pada silinder displacer harus berbentuk rongga beberapa kriteria yaitu konduktifitas termal yang rendah sehingga dapat menekan massa total dari displacer.

Berikut adalah data dari perancangan silinder displacer yang menggunakan bahan aluminium :

- Diameter : 56 mm
- Panjang : 70 mm
- Tebal : 4 mm
- Clearance : 0.25

Maka :

$$\begin{aligned} \emptyset \text{ Displacer} &= \emptyset \text{ silinder} - 2 \text{ radius clearance} \\ &= 56 - 2 \times 0,25 \\ &= 55,5 \end{aligned}$$

Jadi, stroke = (tinggi silinder – tebal displacer) – 2 × clearance

Dengan mengasumsi jarak clearance antara permukaan bawah dan atas yaitu 5 mm, maka:

$$\begin{aligned} \text{Stroke} &= (70 - 40) - 2 \times 5 \\ &= 20 \text{ mm} \end{aligned}$$

2. Menentukan silinder piston

Perancangan material pada silinder piston harus memiliki beberapa kriteria yaitu mampu menahan gesekan/ kompresi pada piston.

Berikut adalah data dari perancangan silinder piston yang menggunakan bahan aluminium :

$$\begin{aligned} \text{Diameter} &: 54 \text{ mm} \\ \text{Panjang} &: 38,5 \text{ mm} \\ \text{Clearance} &: 0,25 \end{aligned}$$

Maka :

$$\begin{aligned} \emptyset \text{ Piston} &= \emptyset \text{ silinder piston} - 2 \times \text{radius clearance} \\ &= 54 - 2 \times 0,25 \\ &= 53,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jadi, stroke = (tinggi silinder – tebal piston) – 2 x clearance

Dengan mengasumsi jarak clearance antara permukaan bawah dan atas yaitu 5 mm, maka:

$$\begin{aligned} \text{Stroke} &= (73 - 38,5) - 2 \times 5 \\ &= 24,5 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. Mendapatkan rasio kompresi

Untuk mencari rasio kompresi, pertama menggunakan perhitungan untuk mencari volume silinder ekspansi pada piston dapat digunakan rumus sebagai berikut :

$$VSE : 1/4 \pi \times D^2 \times S$$

Dimana :

$$\begin{aligned} VSE &: \text{Volume silinder ekspansi (mm}^3\text{)} \\ D &: \text{Diameter piston (mm)} \\ S &: \text{Jarak stroke piston (mm)} \end{aligned}$$

Maka didapatkanlah perhitungan volume silinder ekspansi pada perhitungan berikut :

$$\begin{aligned} VSE &: 1/4 \pi \times 76 \text{ mm}^2 \times 40 \text{ mm} \\ &: 181458,4 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Untuk mencari volume ruang bakarnya digunakanlah rumus sebagai berikut :

$$Vr : \pi \times r^2 \times t$$

Dimana :

$$\begin{aligned} Vr &: \text{Volume ruang bakar (mm}^3\text{)} \\ r &: \text{jari-jari piston (mm)} \\ t &: \text{jarak tinggi stroke pada piston (mm)} \\ Vr &: \pi \times r^2 \times t \end{aligned}$$

$$Vr : \pi \times 26,52 \times 22 \text{ mm}$$

$$Vr : 48536,035 \text{ (mm}^3\text{)}$$

Maka nilai rasio kompresi :

$$\text{Rasio kompresi} : \frac{VSE}{Vr} + 1$$

$$\text{Rasio kompresi} : \frac{181458,4}{48536,035} + 1$$

$$\text{Rasio kompresi} : 4,74$$

4. Mencari konstanta pegas

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Dimana:

f : Frekuensi osilasi (Hz)

k : konstanta pegas (N/m)

m : massa beban (kg)

Sebelum mencari frekuensi osilasinya, perlu diketahui beberapa parameter yang dibutuhkan untuk menentukan perhitungan frekuensi osilasinya yakni konstanta pegasnya. Parameter tersebut bisa dicari menggunakan rumus gaya yang dapat dilihat sebagai berikut :

$$F = -k \times x$$

$$-k = \frac{F}{x}$$

Dimana :

F : Gaya (N)

k : Konstanta pegas (N/m)

x : Jarak perpindahan pegas (m)

Dengan diketahui massa beban dengan jarak perpindahan pegasnya, maka dapat dihitung konstanta pegasnya sebagai berikut: Konstanta pegas pada spring piston :

$$-k = \frac{0,512 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2}{0,0001498 \text{ m}}$$

$$k = 33529,5 \text{ N/m}$$

Didapat nilai konstanta pegas nya (k) yaitu 33529,5 N/m, maka perhitungan frekuensi osilasinya didapat sebagai berikut [8] :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{33529,5 \text{ N/m}}{0,512 \text{ kg}}}$$

$$f = 12,87 \text{ Hz}$$

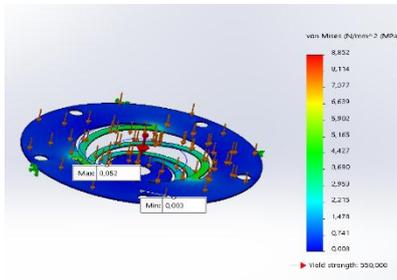
c) Analisis Simulasi

Pada analisis ini menggunakan *software solidworks 2019*, analisis ini diperlukan untuk menghasilkan :

1. Von misses stress

Jika dilihat dari hasil dibawah, maka di dapat nilai minimal sebesar 0,003 N/mm² dan di dapat nilai maksimal 8,852 N/mm²,

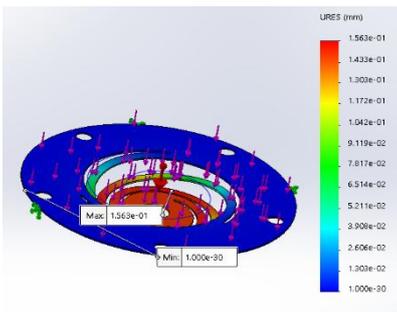
nilai minimal tegangan ditunjukkan dengan warna biru, sedangkan warna merah yaitu nilai maksimal tegangan yang diterima.



Gambar 9. Von misses stress

2. *Displacement*

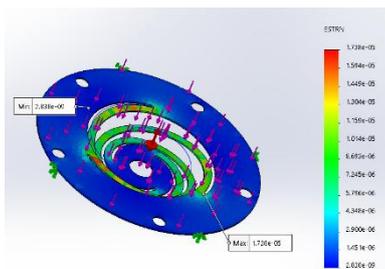
Terlihat pada Gambar 10, *flexure spring* mengalami *displacement* akibat gaya sebesar 1,275 N yang diberikan. Nilai *displacement* maksimal dengan angka $1,563 \times 10^{-1}$ mm dan nilai *displacement* minimal dengan angka $1,000 \times 10^{-30}$ mm, maka hasil perpindahan pada *flexure spring* yaitu $1,536 \times 10^{-1}$ mm.



Gambar 10. *Displacement*

3. *Static strain*

Analisis static strain pada *flexure spring* kedua hasilnya dapat dilihat pada Gambar 11, dengan nilai maksimum $1,738 \times 10^{-5}$ dan mendapatkan nilai minimum sebesar $2,838 \times 10^{-8}$. Sehingga regangan yang didapat pada beban 1,275 N mendapatkan hasil maksimal $1,738 \times 10^{-5}$.



Gambar 11. *Static strain*

4. Faktor keamanan/*safety factors*

Diperoleh hasil 62,13 untuk faktor keamanan, sehingga material *flexure spring* yang terbuat dari bahan SUS SK5 mampu menahan beban dari piston dan rotor, beban yang diberikan pada piston dan rotor yaitu $1,275 \text{ N/mm}^2$ sedangkan untuk kekuatan material SUS SK5 yaitu 550 N/mm^2 .

Tabel 3. Tabel *properties* SUS SK5

Property	Value	Units
Elastic Modulus	200000	N/mm ²
Poisson's Ratio	0.394	N/A
Shear Modulus	318.9	N/mm ²
Mass Density	1020	kg/m ³
Tensile Strength	880	N/mm ²
Compressive Strength		N/mm ²
Yield Strength	550	N/mm ²
Thermal Expansion Coefficient	10	/K
Thermal Conductivity	25	W/(m·K)

Dimana:

n = Faktor keamanan

S_y = Yield Strenght material (N/mm²)

σ_e = Tegangan von misses maksimum (N/mm²)

KESIMPULAN

Setelah melakukan pengambilan data, perhitungan manual, hingga simulasi pada mesin stirling tipe beta yang menggunakan free piston ini, maka didapatkan beberapa kesimpulan yaitu nilai efisiensi yang didapatkan dari mesin stirling tipe beta yang menggunakan inovasi piston bebas ini sebesar 40%. Nilai efektivitas yang didapatkan dari mesin stirling tipe beta yang menggunakan piston bebas ini sebesar 6,1%. Laju perpindahan panas yang terjadi pada aliran fluida pada heater mesin stirling tipe free piston sebesar 216,22 Watt. Jumlah heat-loss (QR) yang terjadi pada regenerator mesin stirling yang menggunakan inovasi free piston sebesar 131,83 Joule.

Dari ketiga konsep varian maka terpilihlah varian yang dijadikan untuk perancangan stirling engine dengan masing – masing nilai, varian 1 dengan nilai 3,4 varian 2 dengan nilai 3,84, varian 3 dengan nilai 3,39 dan varian yang terpilih sebagai perancangan yaitu varian 2 karena mempunyai nilai bobot tertinggi. Pada *flexure spring* yang terhubung pada displacer dan diberikan beban 2,62 N yang menghasilkan frekuensi osilasi sebesar 42,42 Hz. Pada *flexure spring* yang berkontak langsung pada piston dan mendapatkan beban piston dan rotor sebesar 512 N akan menghasilkan frekuensi sebesar 12,62 Hz.

DAFTAR PUSTAKA

- Aditya Sugiyanto, K. (2020). *Rancang Bangun Stirling Engine Tipe Free Piston untuk Aplikasi Alat Concentrated Solar Power (CSP)*. Pancasila University.
- Breeze, P. (2018). Stirling Engines and Free Piston Engines. In *Piston Engine-Based Power Plants*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812904-3.00006-9>
- de la Bat, B. J. G., Dobson, R. T., Harms, T. M., & Bell, A. J. (2020). Simulation, manufacture and experimental validation of a novel single-acting free-piston Stirling engine electric generator. *Applied Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114585>
- Ngwaka, U., Smallbone, A., Jia, B., Lawrence, C., Towell, B., Roy, S., KV, S., & Roskilly, A. P. (2020). Evaluation of performance characteristics of a novel hydrogen-fuelled free-piston engine generator. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.02.072>
- Qiu, S., & Solomon, L. (2019). Free-Piston Stirling Engine Generators. In *Energy Conversion - Current Technologies and Future Trends*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.79413>
- Simanjuntak, W. (2019). *Uji Eksperimental Efisiensi Kinerja Mesin Stirling Tipe Gamma dengan Bahan Bakar Biomassa Berdasarkan Analisis SCHMIDT*. Universitas Sumatera Utara.
- Syahnur Ramadhan, F. (2020). *Simulasi Tabung Heater dan Regenerator pada Mesin Stirling Tipe Beta Menggunakan Inovasi Piston Bebas*. Pancasila University.
- Zhang, H. L., Baeyens, J., Degève, J., & Cacères, G. (2013). Concentrated solar power plants: Review and design methodology. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.032>