

# PERANCANGAN MEKANISME MOTOR STIRLING BERKAPASITAS 1 kW

Toto Hardianto<sup>(1)</sup>, Djoko Suharto<sup>(2)</sup>, Tatacipta Dirgantara<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Lab. Termodinamika PPAU-IR-ITB

<sup>(2)</sup>Lab. Mekanika dan Konstruksi Mesin, Departemen Teknik Mesin ITB

<sup>(3)</sup>Alumni Departemen Teknik Mesin ITB

## Ringkasan

*Motor Stirling termasuk jenis motor pembakaran luar penghasil energi mekanik dari energi termal yang menggunakan siklus Stirling. Secara teoritik, siklus Stirling dapat mencapai efisiensi yang tinggi, setinggi efisiensi siklus Carnot untuk kondisi operasi yang sama.*

*Makalah ini membahas proses perancangan mekanisme motor Stirling dengan penekanan dari aspek kinematika dan dinamikanya. Parameter-parameter termodinamika dan geometri menjadi data masukan yang diperlukan untuk perancangan mekanisme motor Stirling ini, sedangkan aspek material belum diikutkan dalam perancangan. Parameter utama yang ditinjau antara lain: kecepatan putar motor, temperatur kerja, tekanan di dalam ruang fluida kerja, gaya-gaya inersia dan daya keluaran motor Stirling.*

*Hasil perancangan ini cukup baik untuk memberikan gambaran dimensi utama mekanisme motor Stirling. Perhitungan lebih rinci masih diperlukan untuk perancangan tahap selanjutnya.*

## Abstract

*The Stirling engine is an external combustion engine for converting the thermal energy into mechanical energy. This engine uses a Stirling cycle, which theoretically could have high thermal efficiency, which is as high as a Carnot cycle operating at a similar condition.*

*This paper deals with a design process of Stirling engine's mechanism stressing on the kinematics and dynamics aspects. Thermodynamics and geometry parameters are the inputs required for designing the Stirling engine's mechanism. Material aspect has not been included in the design. The main parameters analyzed are: engine's rotational speed, working temperature, cylinder's pressure, inertial forces and power output.*

*The results of the design are useful to give an overall picture of the main dimensions of a Stirling engine. Detail calculations are still needed for more advanced design.*

**Keywords:** *Stirling engine, kinematics mechanism.*

## 1. PENDAHULUAN

Motor Stirling adalah motor pembakaran luar (*external combustion engine*) penghasil energi mekanik dari energi termal yang menggunakan prinsip siklus Stirling [1]. Siklus Stirling dapat mencapai efisiensi termal setinggi siklus Carnot [2]. Proses-proses termodinamika pada siklus Stirling meliputi dua proses temperatur konstan dan dua proses volume konstan yang terjadi secara bergantian [2].

Beberapa keunggulan motor Stirling dibandingkan dengan motor bakar lainnya adalah konstruksi yang relatif sederhana, mampu mencapai efisiensi termal yang tinggi dan tidak terikat pada satu jenis bahan bakar [2]. Keunggulan yang terakhir ini disebabkan karena motor Stirling merupakan motor pembakaran luar. Di samping keunggulannya seperti diuraikan di atas, motor Stirling mempunyai kelemahan utama yaitu respons terhadap perubahan

beban dan perubahan kondisi pembakaran yang lambat. Oleh karena itu motor Stirling lebih cocok untuk sistem dengan beban yang relatif konstan [3,4].

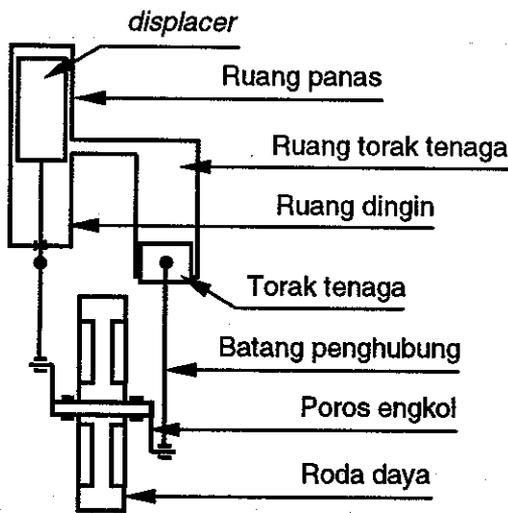
Dalam perancangan sebuah motor Stirling, ada tiga aspek yang perlu diperhatikan, yaitu aspek termodinamika, kinematika-dinamika, dan aspek material yang digunakan [3]. Makalah ini membahas proses perancangan mekanisme motor Stirling dengan penekanan dari aspek kinematika dan dinamikanya. Parameter-parameter termodinamika dan geometri menjadi data masukan yang diperlukan untuk perancangan mekanisme motor Stirling ini, sedangkan aspek material belum ikut dalam perancangannya.

Perancangan ini dilakukan dengan tujuan untuk pembuatan prototipe sebuah motor Stirling sederhana dalam rangka menjajagi pengembangan mesin konversi energi yang dapat mendukung

program-program diversifikasi energi, ramah lingkungan dan efisiensi energi.

## 2. KONSTRUKSI MOTOR STIRLING YANG AKAN DIRANCANG

Konstruksi motor Stirling yang akan dirancang dan dianalisis adalah dari jenis yang relatif sederhana, yang secara skematik ditunjukkan pada Gambar (1). Dasar pengambilan konstruksi tersebut adalah bahwa konstruksi sederhana yang mirip dengan konstruksi motor yang dirancang sudah pernah dibahas dalam pustaka [5] dengan hasil yang memuaskan. Motor tersebut mempunyai dua buah torak, yaitu torak tenaga untuk menghasilkan kerja, dan *displacer* sebagai pemindah fluida kerja dari ruang panas ke ruang dingin atau sebaliknya. Roda daya digunakan untuk menyimpan energi dan untuk menyelaraskan gerak torak tenaga terhadap *displacer*.

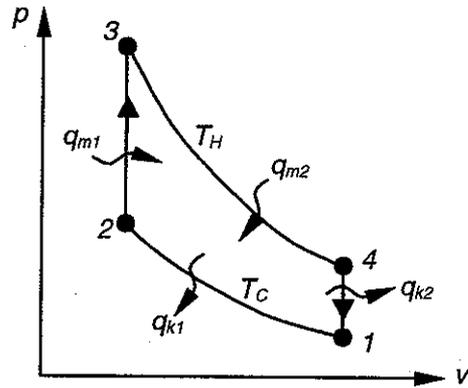


Gambar 1: Skema konstruksi motor Stirling.

Secara singkat, prinsip kerja motor Stirling ini dapat diuraikan sebagai berikut:

Pada posisi seperti Gambar (1), *displacer* menempati ruang panas sedangkan torak tenaga berada pada titik mati bawah, sehingga fluida kerja menempati ruang dingin dan ruang torak tenaga (ditunjukkan pada posisi 1 dalam diagram *p-v* Gambar (2)). Pada saat ini fluida kerja mulai melepaskan kalor  $q_{k1}$  pada temperatur konstan  $T_C$  sehingga volume fluida kerja mengecil dan torak tenaga bergerak menuju titik mati atas. Bersamaan dengan itu, melalui mekanisme engkol dan roda daya, *displacer* bergerak ke ruang dingin, sehingga fluida kerja berpindah dari ruang dingin, sehingga fluida kerja berpindah dari ruang dingin ke ruang panas (proses 1-2 pada Gambar (2)). Selanjutnya kalor sebesar  $q_{m1}$  masuk ke dalam fluida kerja di ruang panas, yang mengakibatkan tekanan fluida kerja naik (proses 2-3 pada Gambar (2)) dan kemudian mendorong torak tenaga bergerak menuju ke titik mati bawah sambil menerima kalor sebesar  $q_{m2}$  (proses 3-4 pada Gambar (2)). Pada saat yang sama, *displacer* bergerak dari ruang dingin ke ruang panas sehingga fluida kerja berpindah dari ruang panas ke ruang dingin. Kemudian kalor sebesar  $q_{k2}$

mengalir dari fluida kerja ke luar melalui proses 4-1 pada Gambar (2), yang mengakibatkan tingkat keadaan kembali seperti pada saat awal.

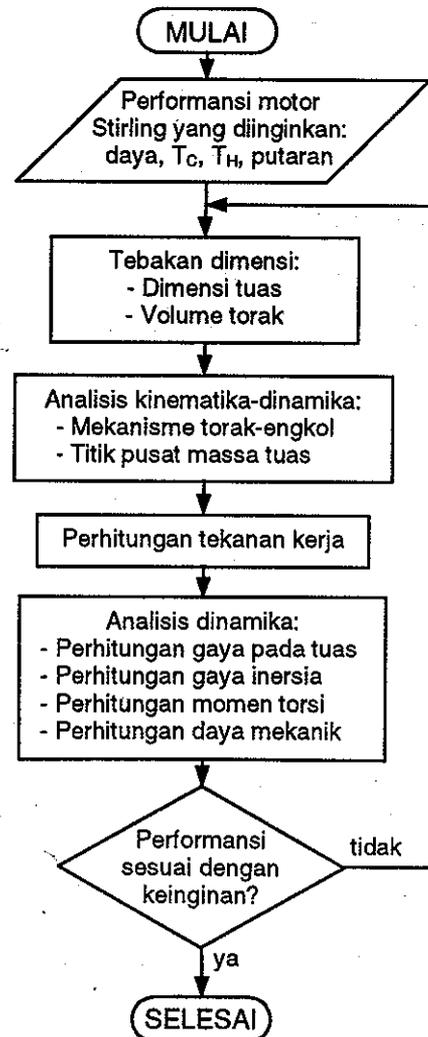


Gambar 2: Diagram *p-v* siklus Stirling.

Proses tersebut berulang dan menghasilkan daya mekanik dalam bentuk torsi dan putaran roda daya.

## 3. DIAGRAM ALIR PERHITUNGAN

Banyak parameter yang harus diperhatikan dalam proses perancangan suatu alat, baik itu untuk memenuhi kriteria teknis maupun non-teknis.

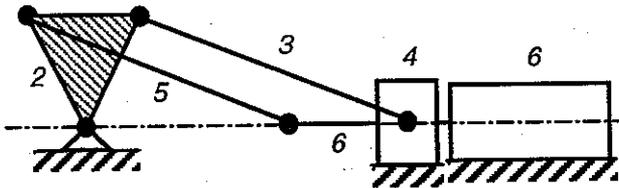


Gambar 3: Diagram alir proses perancangan mekanisme motor Stirling.

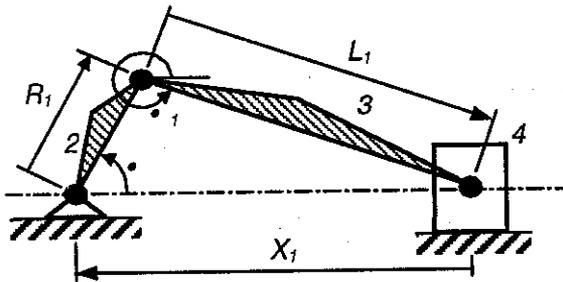
Pada perancangan ini, parameter-parameter yang diperhatikan terdiri dari beberapa parameter utama yang sangat menentukan prestasi motor Stirling. Parameter-parameter tersebut meliputi aspek termodinamika (tekanan, temperatur kerja, volume ruang bakar dan fluida kerja), aspek kinematika (posisi, kecepatan dan percepatan), dan aspek dinamika (gaya, momen torsi, daya mekanik). Secara garis besar, proses perancangan awal ini ditunjukkan dalam diagram alir pada Gambar (3).

#### 4. ANALISIS KINEMATIK MOTOR STIRLING

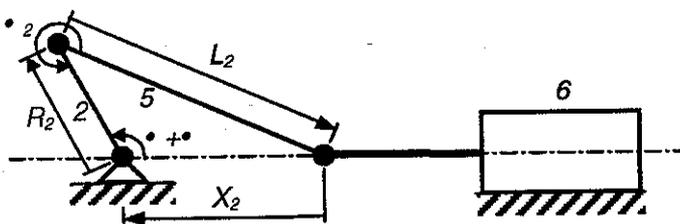
Diagram kinematika sistem motor Stirling ini ditampilkan pada Gambar (4). Sistem ini dapat diuraikan menjadi dua buah mekanisme torak engkol yang berputar dengan kecepatan sudut yang sama, tetapi berbeda fasa. Gerakan geser (*sliding*) dari torak tenaga dan *displacer* melalui sumbu horisontal yang memotong pole  $O_{12}$ . Dengan demikian, analisis kinematik yang umum untuk mekanisme torak-engkol dapat digunakan.



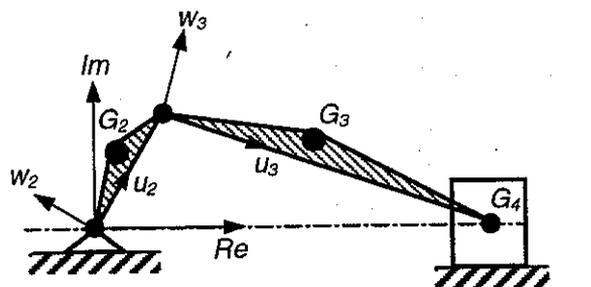
a. Diagram kinematika torak tenaga dan displacer.



b. Mekanisme gerak torak tenaga.



c. Mekanisme gerak displacer.



d. Koordinat global dan lokal (untuk torak tenaga).

Gambar 4: Diagram kinematika motor Stirling.

#### 4.1. Perhitungan Posisi, Kecepatan dan Percepatan Torak serta Sudut, Kecepatan Sudut dan Percepatan Sudut Batang Penghubung

Mekanisme yang dibahas ini akan dianalisis dengan menggunakan metode loop vektor dan metode bilangan kompleks.

Persamaan loop vektor untuk posisi dapat dinyatakan oleh persamaan:

$$\vec{R} + \vec{L} + \vec{X} = 0 \quad (1)$$

atau dalam bentuk skalar:

$$R \cdot \cos \theta + L \cdot \cos \alpha - X = 0 \quad (2)$$

$$R \cdot \sin \theta + L \cdot \sin \alpha = 0 \quad (3)$$

Harga yang tidak diketahui dari persamaan di atas adalah  $\alpha$  dan  $X$ . Solusi persamaan di atas adalah:

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{-R \cdot \sin \theta}{L} \right) \quad (4)$$

$$X = R \cdot \cos \theta + L \cdot \cos \alpha \quad (5)$$

Persamaan loop vektor untuk mencari kecepatan diperoleh dengan mendiferensiasikan Persamaan (2) dan (3).

$$-R \cdot \sin \theta \cdot \dot{\theta} - L \cdot \sin \alpha \cdot \dot{\alpha} - \dot{X} = 0 \quad (6)$$

$$R \cdot \cos \theta \cdot \dot{\theta} + L \cdot \cos \alpha \cdot \dot{\alpha} = 0 \quad (7)$$

Solusi persamaan di atas adalah:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{X} \end{Bmatrix} = \dot{\theta} \cdot \begin{Bmatrix} -R \cdot \cos \theta / L \cdot \cos \alpha \\ -R \sin \theta + R \cos \theta \tan \alpha \end{Bmatrix} \quad (8)$$

Pernyataan  $X$  dapat dinyatakan dalam bentuk lain dengan mengganti  $-R \sin \theta = L \sin \alpha$ , sehingga diperoleh koefisien kecepatan:

$$\begin{Bmatrix} \dot{\alpha} / \dot{\theta} \\ \dot{X} / \dot{\theta} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} K_{\alpha} \\ K_X \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -R \cdot \cos \theta / L \cdot \cos \alpha \\ X \tan \alpha \end{Bmatrix} \quad (9)$$

Persamaan loop vektor untuk percepatan diperoleh dengan mendiferensiasi persamaan loop vektor kecepatan. Dalam bentuk matriks persamaan tersebut adalah:

$$\begin{bmatrix} -L \cdot \sin \alpha & -1 \\ L \cdot \cos \alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{X} \end{Bmatrix} = \ddot{\theta} \begin{Bmatrix} R \cdot \sin \theta \\ -R \cdot \cos \theta \end{Bmatrix} + \dot{\theta}^2 \begin{Bmatrix} R \cdot \cos \theta \\ R \cdot \sin \theta \end{Bmatrix} + \dot{\alpha}^2 \begin{Bmatrix} L \cdot \cos \alpha \\ L \cdot \sin \alpha \end{Bmatrix} \quad (10)$$

Penggabungan Persamaan (10) dan Persamaan (9) memberikan harga-harga  $\ddot{\alpha}$  dan  $\ddot{X}$  sebagai berikut:

$$\begin{Bmatrix} \ddot{\alpha} \\ \ddot{X} \end{Bmatrix} = \ddot{\theta} \begin{Bmatrix} K_{\alpha} \\ K_X \end{Bmatrix} + \dot{\theta}^2 \begin{Bmatrix} L_{\alpha} \\ L_X \end{Bmatrix} \quad (11)$$

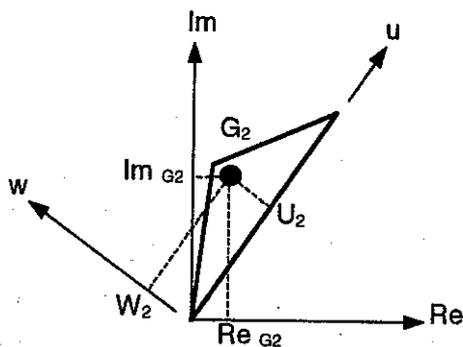
$L_{\alpha}$  dan  $L_X$  adalah turunan  $K_{\alpha}$  dan  $K_X$  terhadap  $\alpha$ , dimana harganya dapat dijabarkan:

$$L_{\alpha} = \frac{R \cdot \sin \theta}{L \cdot \cos \theta} + K_{\alpha}^2 \tan \alpha \quad (12)$$

$$L_X = R \cdot \cos \theta - K_{\alpha}^2 L \cdot \cos \alpha - L_{\alpha} L \cdot \sin \alpha \quad (13)$$

#### 4.2. Perhitungan Posisi, Kecepatan, dan Percepatan Titik Pusat Massa

Untuk menghitung posisi, kecepatan dan percepatan titik pusat massa batang, maka pada masing-masing batang dibuat sumbu lokal batang, yaitu sumbu  $u$  dan sumbu  $w$ . Sumbu  $u$  terletak pada batang dan sumbu  $w$  tegak lurus batang. Jarak titik pusat massa terhadap masing-masing salib sumbu lokal adalah  $U$  dan  $W$ . Penggambaran sumbu-sumbu tersebut diperlihatkan pada Gambar (5). Selanjutnya dengan transformasi koordinat, harga-harga posisi, kecepatan, dan percepatan tersebut dapat dinyatakan dalam koordinat global.



Gambar 5: Pusat massa engkol

Posisi pusat massa engkol setiap saat dinyatakan sebagai fungsi dari sudut  $\alpha$ , sedangkan proyeksinya pada sumbu real dan sumbu imajiner adalah:

$$Re_{G_2} = U_2 \cos \theta - W_2 \sin \theta \quad (14a)$$

$$Im_{G_2} = U_2 \sin \theta + W_2 \cos \theta \quad (14b)$$

Persamaan kecepatan diperoleh dengan cara mendiferensiasikan proyeksi harga posisi pada sumbu real dan sumbu imajiner, yaitu:

$$V_{G_2.Re} = \dot{\theta} \cdot (-U_2 \sin \theta - W_2 \cos \theta) \quad (15a)$$

$$V_{G_2.Im} = \dot{\theta} \cdot (U_2 \cos \theta - W_2 \sin \theta) \quad (15b)$$

Selanjutnya persamaan percepatan pusat massa diperoleh dari diferensiasi persamaan kecepatan:

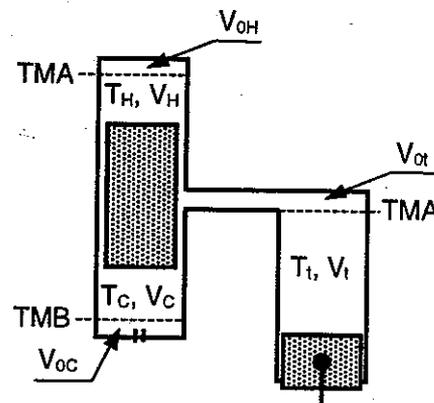
$$A_{G_2.Re} = \ddot{\theta} \cdot (-U_2 \sin \theta - W_2 \cos \theta) + \dot{\theta}^2 \cdot (-U_2 \cos \theta + W_2 \sin \theta) \quad (16a)$$

$$A_{G_2.Im} = \ddot{\theta} \cdot (U_2 \cos \theta - W_2 \sin \theta) + \dot{\theta}^2 \cdot (-U_2 \sin \theta - W_2 \cos \theta) \quad (16b)$$

Dengan cara yang sama, perhitungan posisi, kecepatan dan percepatan pusat massa juga dilakukan untuk batang penghubung, torak tenaga, dan displacer.

#### 5. PERHITUNGAN TEKANAN KERJA

Asumsi yang diterapkan pada fluida kerja adalah sebagai gas ideal dan tekanan sesaatnya di dalam seluruh ruang yang ditempatinya adalah seragam baik itu ruang panas, ruang dingin, dan ruang torak tenaga. Notasi volume dan temperatur pada tiap-tiap ruang fluida kerja ditunjukkan pada Gambar (6).



Gambar 6: Notasi volume dan temperatur pada ruang panas, ruang dingin, dan ruang torak tenaga.

Pada ruang-ruang tersebut berlaku hubungan:

$$p_i V_i = m_i R_i T_i \quad (17)$$

dimana indeks  $i$  menunjukkan ruang  $i$  yang ditempati fluida kerja.

Massa total fluida kerja adalah penjumlahan massa pada tiap-tiap ruang fluida kerja:

$$m = m_H + m_C + m_t \quad (18)$$

Tekanan di setiap bagian fluida kerja adalah sama:

$$p_H = p_C = p_I = p \quad (19)$$

Maka, massa total fluida kerja dan tekanan sesaatnya dapat dirumuskan dari Persamaan (17), (18), dan (19):

$$m = \frac{p.V_H}{R.T_H} + \frac{p.V_C}{R.T_C} + \frac{p.V_I}{R.T_I} \quad (20)$$

$$p = \frac{m.R}{\frac{V_H}{T_H} + \frac{V_C}{T_C} + \frac{V_I}{T_I}} \quad (21)$$

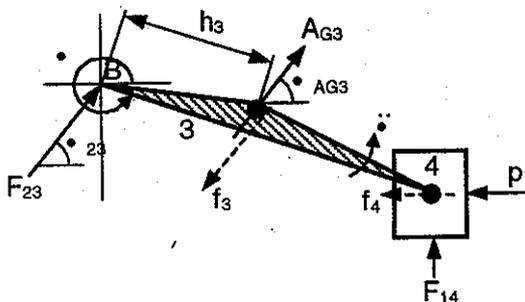
Volume ruang panas dan ruang dingin diperoleh dari hubungan panjang batang engkol  $R_2$ , batang penghubung  $L_2$ , dan posisi sistem *displacer*  $X_2$ . Sedangkan volume ruang torak tenaga diperoleh dari hubungan panjang batang engkol  $R_1$ , batang penghubung,  $L_1$  dan posisi torak tenaga  $X_1$ .

## 6. ANALISIS DINAMIKA MOTOR STIRLING

Perhitungan dan analisis dinamika motor Stirling dilakukan untuk menghitung momen torsi keluaran motor Stirling. Torak dan *batang penghubung* dapat dianalisis bersama untuk memperoleh harga  $F_{23}$ ,  $\theta_{23}$  dan  $F_{14}$  dengan mengabaikan gesekan pada *cylinder liner*. Kemudian gaya  $F_{23}$  dari torak tenaga dan  $F_{25}$  dari *displacer* digunakan bersama untuk menghitung momen torsi pada poros engkol.

### 6.1. Perhitungan Gaya $F_{14}$ , $F_{23}$ dan Sudut $\theta_{23}$

Perhitungan gaya-gaya  $F_{14}$  dan  $F_{23}$  serta sudut  $\theta_{23}$  menggunakan pedoman diagram benda bebas Gambar (7).



Gambar 7: Diagram benda bebas torak tenaga dan batang penghubung.

Dari perhitungan kinematika, telah diketahui harga-harga posisi, kecepatan dan percepatan. Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk memperoleh harga dan arah gaya-gaya  $F_{23}$  dan  $F_{14}$ .

$$F_{23} \cos \theta_{23} + f_3 \cos(\theta_{AG3} + \pi) - (p + f_4) = 0 \quad (22)$$

$$F_{23} \sin \theta_{23} + f_3 \sin(\theta_{AG3} + \pi) + F_{14} = 0 \quad (23)$$

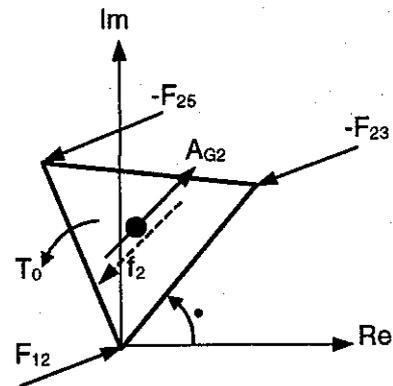
dan persamaan kesetimbangan momen terhadap titik B:

$$F_{14}.L \cos \alpha - (p + f_4)(-L \sin \alpha) - f_3 \sin(\alpha - \theta_{AG3})h_3 = 0 \quad (24)$$

Dari Persamaan (24), dapat diperoleh harga  $F_{14}$ . Kemudian harga-harga  $F_{23}$  dan  $\theta_{23}$  dapat diperoleh melalui Persamaan-persamaan (22) dan (23).

### 6.2. Perhitungan Gaya $F_{12}$ , Momen Torsi dan Daya

Gaya-gaya dan torsi yang terjadi pada batang engkol ditunjukkan melalui diagram benda bebas batang engkol pada Gambar (8).



Gambar 8. Diagram benda bebas batang engkol

Harga-harga  $F_{12}$  dan  $\theta_{12}$  dapat diperoleh melalui dua persamaan kesetimbangan gaya-gaya pada sumbu real dan sumbu imajiner seperti ditunjukkan pada Persamaan (25) dan (26).

$$-F_{23} \cos \theta_{23} - F_{25} \cos \theta_{25} + F_{12} \cos \theta_{12} - f_2 \cos \theta_{AG2} = 0 \quad (25)$$

$$-F_{23} \sin \theta_{23} - F_{25} \sin \theta_{25} + F_{12} \sin \theta_{12} - f_2 \sin \theta_{AG2} = 0 \quad (26)$$

Dari persamaan kesetimbangan terhadap titik pusat massa link 2, yaitu  $G_2$ , diperoleh harga momen torsi  $T_0$ . Kemudian daya motor Stirling untuk setiap posisi torak tenaga diperoleh dari hubungan torsi dan kecepatan sudut:

$$\text{Daya} = T_0 \cdot \dot{\theta} \quad (27)$$

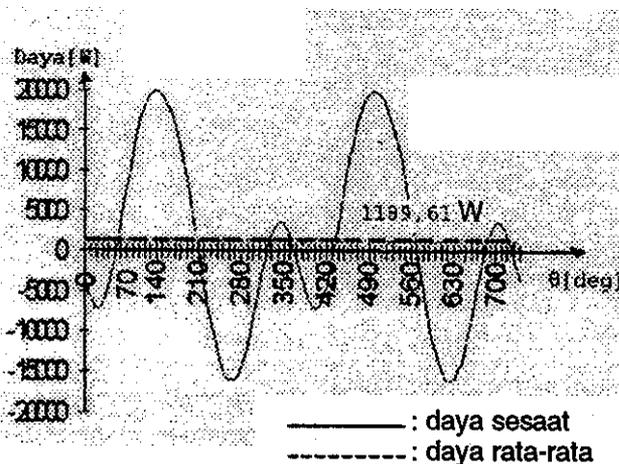
## 7. DIMENSI UTAMA MOTOR STIRLING HASIL PERANCANGAN

Penentuan dimensi motor Stirling dilakukan secara numerik seperti pada diagram alir Gambar (3) melalui beberapa iterasi, dengan memperhatikan beberapa batasan (perbandingan panjang engkol dengan batang penghubung, perbandingan panjang langkah dengan diameter silinder, dan temperatur ruang panas dan ruang dingin). Dari proses ini diperoleh dimensi utama motor Stirling berkapasitas 1 kW, yaitu:

Volume langkah, panjang langkah, dan diameter silinder untuk ruang torak tenaga, dibuat untuk mempunyai harga yang sama dengan yang untuk ruang *displacer*.

Volume langkah : 625 cc  
 Panjang langkah x diameter Silinder : 90 x 94 mm  
 Diameter torak tenaga sama dengan diameter silinder, sedangkan diameter *displacer* agak lebih kecil sehingga ada celah untuk aliran fluida kerja dari ruang dingin ke ruang panas atau sebaliknya.  
 Panjang engkol ( $R_1$  dan  $R_2$ ) : 45 mm  
 Panjang batang penghubung ( $L_1$  dan  $L_2$ ) : 160 mm  
 (untuk  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $L_1$  dan  $L_2$ , lihat gambar (4b) dan (4c))  
 Temperatur ruang dingin : 35 °C  
 Temperatur ruang panas : 250 °C

Daya sesaat dan daya rata-rata yang dihasilkan oleh motor Stirling hasil perancangan, telah dihitung berdasarkan Persamaan (27) untuk putaran 1000 rpm dengan menggunakan program komputer. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa daya rata-rata yang dicapai adalah sebesar 1,189 kW. Kurva daya terhadap sudut engkol ( $\theta$ ) hasil perhitungan ditunjukkan melalui Gambar (9).



Gambar 9: Kurva daya terhadap sudut engkol ( $\theta$ ).

Perancangan ini, dalam kesempatan yang akan datang, akan dilanjutkan dengan analisis termal dan analisis material dalam bentuk perhitungan-perhitungan yang lebih rinci untuk memperoleh rancangan lengkap yang siap untuk dibuat prototipenya.

## 8. KESIMPULAN

Analisis kinematika dan dinamika dengan metode bilangan kompleks dan *loop* vektor beserta perhitungan numerik dengan bantuan komputer, cukup mudah diterapkan dalam perancangan mekanisme motor Stirling ini.

Besaran geometri utama dan temperatur kerja hasil perancangan menunjukkan bahwa motor Stirling ini relatif kompak dan sederhana, sehingga memungkinkan untuk diadaptasikan dengan mudah pada tungku briket batubara rumah tangga untuk memenuhi kebutuhan daya mekanik skala kecil.

## 9. UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian tentang motor Stirling ini terselenggara melalui program Hibah bersaing III Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi Depdiknas. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih atas dukungannya.

## 9. DAFTAR PUSTAKA

1. W. Arismunandar, *Penggerak Mula Motor Bakar Torak*, Penerbit ITB, Bandung, 1994.
2. T. Hardianto, *Simulasi dan Optimasi Unjuk Kerja Termodinamik Motor Stirling*, Tugas Sarjana Jurusan Teknik Mesin ITB, Bandung, 1984.
3. T. Hardianto, N.P. Tandian, T.A.F. Soelaiman, T.C. Dirgantara, *Prototipe Motor Stirling Temperatur Rendah untuk Mendapatkan Energi Mekanis dari Tungku Briket Batubara yang Terutama Menghasilkan Energi Kalor (Co-Generation)*, Laporan Akhir Penelitian Hibah Bersaing III/3, Bandung, 1996.
4. T. Hardianto, M. Samudro, *Simulasi dan Analisis Unjuk Kerja Termodinamik Motor Stirling*, Proceedings 3<sup>rd</sup> International Symposium, Short Courses and Exposition on Rotating Machinery, Bandung, November 24 - 26, 1993.
5. Lisdiyanto, *Optimasi Dinamika Motor Stirling Untuk Memperoleh Unjuk Kerja Daya Poros Berguna Terbesar*, Tugas Sarjana Jurusan Teknik Mesin ITB, Bandung, 1984.