

# Perancangan Termodinamik Sirkuit Gas Motor Stirling FP150W dengan Metode Penskalaan (*Scaling Method*)

Oegik Soegihardjo

Dosen Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Mesin – Universitas Kristen Petra

## Abstrak

Metode penskalaan (*scaling method*) merupakan salah satu alternatif yang dipakai untuk perancangan termodinamik motor baru (*derivative engine*). Dibandingkan dengan alternatif lainnya, metode penskalaan ini memiliki keunggulan tersendiri. Keunggulan pertama adalah proses perancangan bisa dilakukan dengan cepat. Keunggulan kedua adalah unjuk kerja secara termodinamik bisa diprediksikan dengan ketepatan yang baik.

Penerapan metode penskalaan dalam perancangan termodinamik motor baru mensyaratkan penentuan parameter-parameter yang mempengaruhi unjuk kerja motor yang sedang dirancang, penentuan unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) serta spesifikasi lengkap dari motor yang sudah ada (*prototype engine*) yang akan dipakai sebagai acuan untuk perancang termodinamik motor yang baru.

Perancangan termodinamik ini merupakan rangkaian dari penelitian untuk mengembangkan motor baru berdasarkan motor yang sudah ada, yaitu Sunpower FP300W.

Kata kunci: unit tidak berdimensi, sirkuit gas, perancangan termodinamik, efisiensi indikatif, kerja spesifik per siklus.

## Abstract

*Scaling method is an alternative for thermodynamic design of a new engine. The benefits of this method are the design process can be done quite fast and guarantee that thermodynamic performance of the new engine (derivative engine) will be the same as that of the existing engine (prototype engine).*

*Thermodynamic design by scaling method requires determination of parameters that influence the engine performance; dimensionless groups; and complete specifications of an existing engine. Those requirements are needed as a reference for thermodynamic design of the new engine. This thermodynamic design is a part of research to develop the new engine based on the Sunpower FF300W.*

*Keywords: dimensionless groups, gas circuit, thermodynamic design, indicative efficiency, specific cycle work.*

## 1. Pendahuluan

Dalam perancangan, dikenal sejumlah unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) yang mempunyai peran penting. Beberapa diantaranya sering muncul pada analisa yang berkaitan dengan mekanika fluida, seperti *Reynolds number*, *Mach number*, *Euler number*, *Froude number* dan lain-lain. Pemahaman yang benar tentang arti fisik dari *dimensionless group* tersebut akan membantu pemahaman tentang fenomena yang sedang dipelajari.

Penerapan metode penskalaan untuk perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling juga tidak lepas dari unit tidak berdimensi (*dimensionless group*). Karena karakteristik motor Stirling yang khusus, unit tidak

berdimensi yang digunakan dalam perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling juga khusus/spesifik. Unit tidak berdimensi tersebut menggambarkan fenomena-fenomena yang terjadi pada motor Stirling.

Berkenaan dengan perancangan termodinamik menggunakan metode penskalaan, Allan J. Organ [2] menyatakan bahwa jika parameter input dari motor yang dirancang mempunyai nilai yang sama dengan parameter input motor asal, maka kedua motor tersebut ekuivalen secara termodinamik, sehingga akan menghasilkan efisiensi indikatif serta kerja spesifik per siklus yang sama.

## 2. Unit Tidak Berdimensi (*Dimensionless Group*)

Sebelum membahas secara khusus tentang unit tidak berdimensi yang diterapkan dalam perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling, perlu dijelaskan tentang bagian mana

---

**Catatan :** Diskusi untuk makalah ini diterima sebelum tanggal 1 Juli 2000. Diskusi yang layak muat akan diterbitkan pada Jurnal Teknik Mesin Volume 2 Nomor 2 Oktober 2000.

yang dimaksud dengan sirkuit gas motor Stirling serta parameter-parameter apa saja yang mempengaruhi unjuk kerja motor Stirling (di mana parameter-parameter ini akan dipakai dalam unit tidak berdimensi).

Sirkuit gas motor Stirling merupakan bagian-bagian dari motor Stirling yang kontak/dilalui oleh fluida kerja selama motor beroperasi. Bagian-bagian yang dilalui fluida kerja tersebut meliputi *expansion heat exchanger*, *regenerator*, serta *compression heat exchanger*. Motor Stirling merupakan motor pembakaran luar (*external combustion engine*).

Sedangkan parameter-parameter yang mempengaruhi unjuk kerja motor Stirling yang dikemukakan oleh Allan J Organ [2], adalah sebagai berikut:

- $n_s$  frekuensi piston, (1/detik)
- $R_H$  radius hidrolis, (m), di mana dalam hal ini  $R_H$  dipakai untuk menunjukkan characteristic length dari geometri motor Stirling.
- $R$  konstanta gas (fluida kerja), (J/kg K)
- $T_{ref}$  temperatur referensi, dalam hal ini temperatur ruang kompresi diambil sebagai referensi, (K)
- $p_{ref}$  tekanan referensi, (Pa)
- $z$  viskositas dinamik fluida kerja, (Pa.s)
- $k_r$  konduktifitas panas dari regenerator, (J/s.m.K)

Berdasarkan parameter-parameter di atas Allan J. Organ mengembangkan tiga unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) yang akan digunakan pada metode penskalaan untuk merancang sirkuit gas motor Stirling. Ketiga unit tidak berdimensi tersebut adalah  $N_{MA}$  (*Mach number*),  $N_{SG}$  (*Stirling number*) dan  $N_H$  (*heatflux number*).

Unit tidak berdimensi yang pertama adalah *Mach number*. Sebagaimana dikenal dalam mekanika fluida, *Mach number* merupakan suatu unit tidak berdimensi yang menunjukkan efek kompresibilitas (*compressibility effects*) pada aliran yang dinyatakan sebagai berikut

$$M = V/c \quad (1)$$

di mana  $V$  adalah kecepatan aliran fluida yang diamati dan  $c$  adalah kecepatan suara pada fluida tersebut (*local sonic speed*). Karena fluida kerja pada motor Stirling bersilasi selama mesin bekerja dan disertai dengan perubahan tekanan dan temperatur yang cukup besar, maka efek kompresibilitas menjadi faktor penting yang harus dipertimbangkan. Untuk motor Stirling, perumusan *Mach number* yang dikemukakan oleh Allan J. Organ adalah sebagai berikut:

$$N_{MA} = n_s R_H / (R T_{ref})^{0.5} \quad (2)$$

Jika dua motor yang secara dinamik serupa (*dynamically similar*) memiliki  $N_{MA}$  yang sama, maka efek kompresibilitas dari dua motor tersebut adalah identik untuk semua lokasi pada setiap sudut engkol (*crank angles*).

Unit tidak berdimensi kedua adalah *Stirling number* yang dirumuskan sebagai berikut:

$$N_{SG} = P_{ref} / n_s \mu \quad (3)$$

*Stirling number* ini menyatakan rasio antara efek tekanan dan efek viskositas. Karena selama fluida kerja motor Stirling bersilasi pada saat motor bekerja, maka parameter-parameter seperti tekanan, viskositas dan inersia akan mempunyai pengaruh yang dominan pada unjuk kerja motor. Karena efek inersia sudah terakomodasi dalam *Mach number*, maka dua efek yang tersisa (efek tekanan dan viskositas) dinyatakan sebagai *Stirling number*.

Unit tidak berdimensi ketiga adalah *Heat flux number*, dan dirumuskan sebagai berikut:

$$N_H = p_{ref} n_s R_H^2 / (k_r T_{ref}) \quad (4)$$

*Heat flux number* ini menyatakan kompatibilitas proses perpindahan panas dari fluida kerja ke dinding-dinding penukar kalor (*heat exchanger*) yang terdiri dari *expansion exchanger*, *regenerator* dan *compression exchanger* maupun sebaliknya (dari dinding-dinding penukar kalor ke fluida kerja). Unjuk kerja motor Stirling sangat dipengaruhi oleh proses perpindahan panas antara fluida kerja dengan dinding-dinding penukar kalor. Dengan demikian perancangan penukar kalor merupakan bagian yang tidak bisa dipisahkan dari keseluruhan proses perancangan sirkuit gas motor Stirling. Jika dua motor yang secara dinamik serupa, memiliki nilai *Heat flux number* yang sama, maka proses perpindahan panas dari kedua motor tersebut juga sama/identik.

Allan J Organ lebih jauh menggabungkan ketiga unit tidak berdimensi tersebut, dan menyatakannya sebagai  $N_k$ , yang dirumuskan sebagai berikut

$$N_X = N_H / N_{MA}^2 N_{SG}, = R \mu / k_r \quad (5)$$

Untuk menjamin agar perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling dengan metode penskalaan berhasil dengan baik (sehingga sirkuit gas motor yang baru menjadi serupa secara termodinamik dengan motor asalnya), maka nilai-nilai  $N_{MA}$ ,  $N_{SG}$  dan  $N_H$  dari motor baru (*derivative engine*) harus sama dengan nilai-nilai  $N_{MA}$ ,  $N_{SG}$  dan  $N_H$  dari motor asalnya (*prototype engine*).

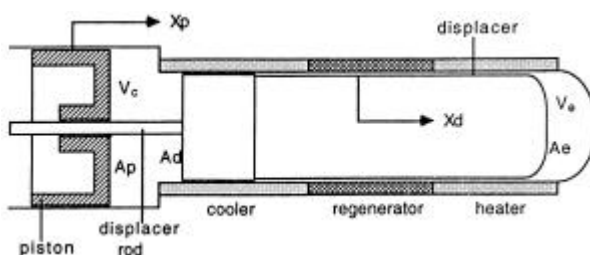
### 3. Perancangan Sirkuit Gas Motor Stirling

Sebagaimana disebutkan dalam abstraksi, acuan dalam dalam perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling ini adalah motor Stirling jenis *free-piston* dengan daya 300 W (Sunpower FP300W). Motor ini dibuat oleh Sunpower Inc., Athens, Ohio.

Fluida kerjanya adalah gas helium dan merupakan motor pembakaran luar. Motor disekat sedemikian rupa sehingga fluida kerja tidak mungkin keluar dari sirkuit gas motor yang dimaksud.

Sirkuit gas motor Stirling yang akan dirancang dapat dilihat pada gambar 1. Sirkuit gas tersebut merupakan ruang yang berada diantara piston dan *displacer* ( $V_c$ ), ruang di dalam *cooler/compression exchanger, regenerator, heater/expansion exchanger* maupun ruang antara *displacer* dengan dinding motor ( $V_e$ ). Selama motor beroperasi, *displacer* maupun piston bergerak bolak-balik dengan frekuensi 60 Hz. Fluida kerja juga akan bergerak bolak-balik (osilasi) sesuai dengan gerakan *displacer* dan piston.

Dengan metode penskalaan untuk perancangan termodinamik sirkuit gas ini, maka motor baru (*derivative engine*, motor Stirling FP 150W) akan memiliki unjuk kerja yang sama dengan motor asal (*prototype engine*, Sunpower FP 300W). Sebagaimana disebutkan sebelumnya, motor baru yang dirancang direncanakan memiliki daya 150 W (daya motor baru 0,5 kali daya motor asal). Data hasil perancangan dengan metode penskalaan untuk motor baru akan diuji melalui simulasi komputer untuk menguji apakah unjuk kerja motor baru akan sama dengan unjuk kerja motor asal.



Gambar 1. Skema Sirkuit Gas Motor Stirling

#### Langkah Perancangan dengan Metode Penskalaan

Secara garis besar, langkah-langkah perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling dengan metode penskalaan adalah sebagai berikut:

1. Mendapatkan data lengkap dari motor asal (*prototype engine*, Sunpower FP300W) yang akan dipakai sebagai acuan untuk merancang motor baru (*derivative engine*). Data lengkap dari motor asal yang mutlak harus ada, dapat dilihat pada lampiran (tabel 1).
2. Penentuan unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) sedemikian rupa sehingga sirkuit gas motor baru yang dirancang, secara termodinamik akan sama dengan sirkuit gas motor asal. Unit tidak berdimensi yang dipakai dalam perancangan ini adalah sebagaimana yang dirumuskan di rumus 2 sampai dengan 5.
3. Menentukan kondisi operasi dari motor baru yang akan dirancang. Dalam perancangan ini, kondisi operasi motor baru yang direncanakan/ditentukan adalah daya indikatif, yang besarnya dipilih sebesar 150 W (daya indikatif motor baru besarnya 0,5 kali daya indikatif motor asal). Kondisi operasi lainnya yang ditentukan adalah frekuensi ( $n_s$ , frekuensi motor baru = frekuensi motor asal, 60 Hz) dan temperatur referensi (temperatur ruang kompresi diambil sebagai temperatur referensi). Temperatur referensi motor baru ditentukan sama dengan temperatur ruang kompresi motor asal.
4. Menghitung nilai dari unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) yang telah ditentukan ( $N_{SG}$ ,  $N_{MA}$ ,  $N_H$  maupun  $N_x$ ), berdasarkan data spesifikasi motor asal.
5. Menentukan nilai-nilai dari rasio temperatur ( $N_T$ ), *volume phase angle* ( $\alpha$ ), *swept volume ratio*  $K$  (kappa huruf Yunani) untuk motor baru. Dalam perancangan ini nilai ketiga parameter tersebut (untuk motor baru) ditetapkan sama dengan motor lama agar keserupaan termodinamik bisa dijamin.
6. Menghitung dimensi dari sirkuit gas motor baru yang dirancang berdasarkan ketentuan-ketentuan yang telah ditetapkan pada langkah 1-5 di atas.

#### 4. Data serta Analisa Data Hasil Perancangan

Data hasil perancangan termodinamik sirkuit gas motor yang baru dengan metode penskalaan dapat dilihat pada tabel 2 di lampiran. Pada tabel 2 tersebut dicantumkan sekaligus dimensi dari sirkuit gas serta beberapa parameter mesin asal Sunpower FP300W agar bisa dibandingkan secara langsung dengan motor baru yang dirancang (*derivative engine*). Nilai dari beberapa

parameter serta unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) yang dipakai dalam proses perancangan ini adalah sebagai berikut:

|                                               |             |
|-----------------------------------------------|-------------|
| 1. Rasio temperatur ( $N_T$ )                 | 2,393       |
| 2. Volume phase angle ( $\alpha$ ),<br>radian | 1,913765    |
| 3. Swept volume ratio K ( $\kappa$ )          | 1,084       |
| 4. Frekuensi ( $n_s$ ), Hz                    | 60          |
| 5. Temperatur referensi ( $T_{ref}$ ), K      | 323         |
| 6. Fluida kerja                               | Gas helium  |
| 7. Tekanan referensi ( $p_{ref}$ ), Pa        | 14E+05      |
| 8. Viskositas dinamik ( $\mu$ ), Pa s         | 0,01875E-03 |
| 9. Mach number ( $N_{MA}$ )                   | 8,5425E-06  |
| 10. Stirling number ( $N_{SG}$ )              | 1,244E+09   |
| 11. Heat flux number ( $N_H$ )                | 2,2135E-04  |
| 12. $N_X$ ( $N_X = N_H/N_{SG} N_{MA}^2$ )     | 2,4375E-03  |

Data lain seperti panjang langkah displacer serta panjang langkah piston untuk motor baru (yang nilai-nilainya sama dengan motor asal), tercantum pada tabel 2.

### Analisa Data

Pada bagian awal disebutkan bahwa metode perancangan termodinamik sirkuit gas dengan metode penskalaan akan menghasilkan motor baru (*derivative engine*) yang secara termodinamik sama dengan motor asal (*prototype engine*). Dua motor yang secara termodinamik identik (sama) akan menghasilkan kerja spesifik per siklus (*specific cycle work*) dan efisiensi indikatif (*indicated efficiency*) yang sama. Berdasarkan simulasi dapat dilihat pada tabel 2, bahwa kerja spesifik per siklus dan efisiensi indikatif dari kedua motor (motor asal maupun motor baru) memang sama. Kerja spesifik per siklus untuk kedua motor adalah 0,0318 sedangkan efisiensi indikatif kedua motor adalah 0,5821. Dengan demikian metode ini memang bisa diandalkan untuk perancangan motor baru bila yang diharapkan adalah motor baru yang secara termodinamik identik dengan motor asalnya.

Dimensi motor baru dengan daya 150 W memang lebih kecil dibandingkan dengan motor asal, karena dalam perancangan motor baru besarnya daya ditetapkan 0,5 kali dari motor asal yang berdaya 300 W (Sunpower FP300W). Perbedaan dimensi ini terlihat pada dimensi *displacer*, *piston*, *expansion exchanger (heater)*, *regenerator* maupun *compression exchanger (cooler)*. Perbedaan dimensi kedua motor dapat dilihat pada tabel 2 di lampiran.

## 5. Kesimpulan

Perancangan termodinamik sirkuit gas motor Stirling dengan metode penskalaan memberi jaminan bahwa unjuk kerja motor baru yang dirancang akan sama/identik dengan motor asalnya. Perancangan dengan metode penskalaan ini dapat dilakukan dengan cepat, asal spesifikasi lengkap dari motor asal tersedia, pemilihan parameter operasi yang mempengaruhi unjuk kerja motor serta pemilihan unit tidak berdimensi (*dimensionless group*) dilakukan dengan tepat.

## Daftar Pustaka

1. Organ, A.J., *Thermodynamics and Gas Dynamics of the Stirling Cycle Machine*. Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
2. Organ, A.J., *Intimate Thermodynamic Design of the Stirling Engine Gas Circuit without the Computer*. Proc. Inst. Mech. Engrs. 205 Pt. C 1991 p 421-431.
3. Soegihardjo, O., *Natural Coordinates to Analyze the Sunpower 300 W Freepiston Stirling Engine*. Research, College of Engineering and Technology. Ohio University, Athens, Ohio, 1993.
4. Urieli, I., Berchowitz, D.M., *Stirling Cycle Engine Analysis*. Adam Hilger Ltd., Bristol. 1994.

## Lampiran:

Tabel 1. Spesifikasi Sunpower FP300W (Motor Asal/Prototype Engine)

| Parameter (Simbol), Satuan                         | Nilai      |
|----------------------------------------------------|------------|
| Fluida kerja                                       | gas helium |
| Frekuensi ( $n_s$ ), Hz                            | 60         |
| Tekanan kerja ( $p$ ), Pa                          | 14E+05     |
| Temperatur ruang kompresi ( $T_c$ ), K             | 323        |
| Temperatur ruang ekspansi ( $T_e$ ), K             | 773        |
| Amplitudo piston ( $X_{pa}$ ), m                   | 7,0E-03    |
| Diameter piston ( $D_p$ ), m                       | 5,6E-02    |
| Amplitudo displacer ( $X_{da}$ ), m                | 7,05E-03   |
| Diameter displacer ( $D_d$ ), m                    | 5,05E-02   |
| Diameter batang displacer ( $D_{rod}$ ), m         | 1,0E-02    |
| Sudut fase displacer ( $\varphi$ ), derajat        | 59,69      |
| <u>Expansion exchanger (heater, tipe slot):</u>    |            |
| Panjang heater ( $L_{xe}$ ), m                     | 4,0E-02    |
| Tinggi heater ( $H_{xe}$ ), m                      | 7,0E-03    |
| Lebar heater ( $W_{xe}$ ), m                       | 3,0E-04    |
| Jumlah slot ( $N_{xe}$ )                           | 120        |
| Luas penampang heater ( $A_{xe}$ ), m <sup>2</sup> | 2,52E-04   |
| Luasan terbasahi ( $A_{wxe}$ ), m <sup>2</sup>     | 70,082E-03 |
| Dead volume ( $V_{dxe}$ ), m <sup>3</sup>          | 10,0E-06   |
| <u>Regenerator (tipe foil):</u>                    |            |
| Panjang regenerator ( $L_r$ ), m                   | 4,2E-02    |
| Diameter luar housing ( $D_{oreg}$ ), m            | 7,2E-02    |
| Diameter dalam housing ( $D_{reg}$ ), m            | 6,9E-02    |
| Diameter dalam foil ( $D_{ireg}$ ), m              | 5,3E-02    |
| Tebal foil, m                                      | 25,0E-06   |
| Foil gap, m                                        | 100,0E-06  |
| Porositas regenerator                              | 0,8        |
| Luas penampang ( $A_{xr}$ ), m <sup>2</sup>        | 12,26E-04  |
| Luasan terbasahi ( $A_{wrr}$ ), m <sup>2</sup>     | 1,055      |
| Dead volume ( $V_{dr}$ ), m <sup>3</sup>           | 52,74E-06  |
| <u>Compression exchanger (cooler, tipe slot):</u>  |            |
| Panjang cooler ( $L_{xc}$ ), m                     | 3,5E-02    |
| Tinggi cooler ( $H_{xc}$ ), m                      | 5,0E-03    |
| Lebar cooler ( $W_{xc}$ ), m                       | 3,0E-04    |
| Jumlah slot ( $N_{xc}$ )                           | 120        |
| Luas penampang cooler ( $A_{xc}$ ), m <sup>2</sup> | 1,8E-04    |
| Luasan terbasahi ( $A_{wxc}$ ), m <sup>2</sup>     | 44,52E-03  |
| Dead volume ( $V_{dxc}$ ), m <sup>3</sup>          | 6,3E-06    |

Tabel 2. Hasil rancangan sirkuit gas motor Stirling (motor baru/*derivative engine*) dengan metode pensjalaan. Sunpower FP300W adalah motor asal (*prototype engine*)

| Parameter (Simbol), Satuan                        | Motor Asal | Motor Baru |
|---------------------------------------------------|------------|------------|
| Amplitudo displacer ( $X_{da}$ ), m               | 7,05E-03   | 7,05E-03   |
| Diameter displacer ( $D_d$ ), m                   | 5,05E-02   | 3,2E-02    |
| Diameter batang displacer ( $D_{rod}$ ), m        | 1,0E-02    | 8,0E-03    |
| Amplitudo piston ( $X_{pa}$ ), m                  | 7,0E-03    | 7,0E-03    |
| Diameter piston ( $D_p$ ), m                      | 5,6E-02    | 3,6E-02    |
| Sudut fase, derajat                               | 59,69      | 59,69      |
| <u>Compression exchanger (cooler, tipe slot):</u> |            |            |
| Lebar cooler ( $W_{xc}$ ), m                      | 3,0E-04    | 3,0E-04    |
| Tinggi cooler ( $H_{xc}$ ), m                     | 5,0E-03    | 2,0E-03    |
| Panjang cooler ( $L_{xc}$ ), m                    | 3,5E-02    | 3,5E-02    |
| Jumlah slot ( $N_{xc}$ )                          | 120        | 120        |
| <u>Regenerator (tipe foil):</u>                   |            |            |
| Diameter luar housing ( $D_{oreg}$ ), m           | 7,25E-02   | 4,75E-02   |
| Diameter internal housing ( $D_{reg}$ ), m        | 6,9E-02    | 4,45E-02   |
| Diameter internal foil ( $D_{ireg}$ ), m          | 5,3E-02    | 3,45E-02   |
| Panjang regenerator ( $L_r$ ), m                  | 4,2E-02    | 4,3E-02    |
| Porositas regenerator                             | 0,8        | 0,8        |
| <u>Expansion exchanger (heater, tipe slot):</u>   |            |            |
| Lebar heater ( $W_{xe}$ ), m                      | 3,0E-04    | 3,0E-04    |
| Tinggi heater ( $H_{xe}$ ), m                     | 7,0E-03    | 2,8E-03    |
| Panjang heater ( $L_{xe}$ ), m                    | 4,0E-02    | 4,0E-02    |
| Jumlah slot                                       | 120        | 120        |
| Tekanan kerja ( $p$ ), Pa                         | 14,0E+05   | 14,0E+05   |
| Fluida kerja                                      | gas helium | gas helium |
| Temperatur ekspansi ( $T_e$ ), K                  | 773        | 773        |
| Temperatur kompresi ( $T_c$ ), K                  | 323        | 323        |
| Rasio temperatur ( $N_T$ )                        | 2,393      | 2,393      |
| Kerja spesifik per siklus ( $\xi$ )               | 0,0318     | 0,0318     |
| Efisiensi indikatif ( $\eta$ )                    | 0,5821     | 0,5821     |