

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian yang Pernah Ada

Penelitian sebelumnya dilakukan oleh Soegihardjo pada tahun 2000. Penelitian yang berjudul “Perancangan Termodinamik Sirkuit Gas Motor *Stirling* FP150W dengan Metode Penskalaan” Membahas tentang perancangan mesin *stirling* FP150W dengan acuan mesin yang sudah ada yaitu FP300W. Metode yang digunakan adalah metode penskalaan agar mesin yang dibuat identik dengan mesin sebelumnya. Hasil dari penelitian ini adalah sirkuit gas motor baru yang dirancang akan sama dengan sirkuit gas motor asal secara *thermodynamic* [1].

Selanjutnya penelitian oleh Yuliantono Pada tahun 2010. Sebuah penelitian dengan judul “Perancangan Termodinamika dan Pengujian *Prototype* Motor *Stirling* Tipe *Alpha* dengan Konfigurasi V-90”. Membahas tentang perancangan mesin *stirling* dengan dua silinder (tipe *alpha*) dan siklus *thermodynamika* yang terjadi didalamnya. Metode penelitian yang digunakan adalah dengan *brainstorming*. Hasil dari penelitian ini adalah *prototype* mesin *stirling* tipe *alpha* [2].

Selanjutnya pada tahun 2013 penelitian dilakukan oleh Syafrudin dkk yang berjudul “Pembangkit Listrik Tenaga Panas Matahari Berbasis Mesin *Stirling* Untuk Skala Rumah Tangga” bertujuan untuk bertujuan untuk membuat sebuah pembangkit listrik ramah lingkungan bertaraf rumah tangga. Pada penelitian ini dilakukan dengan membuat sebuah pembangkit tenaga panas matahari dengan menggunakan mesin *stirling* sebagai alat pembangkit listriknya dengan menggunakan mesin *stirling* sebagai media reflektornya [3].

Selanjutnya masih di tahun 2013 penelitian yang dilakukan oleh Widodo dengan judul “Studi Eksperimen *Output* Daya Pada Motor *Stirling* Td 295 Tipe Gamma Dengan Menggunakan *Stirling Engine Control* V.1.5.0”. Membahas tentang studi eksperimen *output* daya pada motor *stirling* Td 295 Tipe Gamma dengan menggunakan *engine control* V.1.5.0 untuk mengetahui *flow waternya* [4].

Masih di tahun 2013 penelitian oleh Januar yang berjudul “*Perancangan Dan Pembuatan Alat Peraga Mesin Stirling Di SMK PGRI 1 Surakarta*”. Penelitian yang dilakukan oleh peneliti saat itu adalah merancang alat bantu peraga pendidikan berupa desain dan pembuatan prototype mesin *stirling* untuk siswa SMK [5].

## **2.2 Teori Dasar**

### **2.2.1 Sumber Energi Matahari**

Energi surya atau matahari telah dimanfaatkan di banyak belahan dunia dan jika dieksploitasi dengan tepat, energi ini berpotensi mampu menyediakan kebutuhan konsumsi energi dunia saat ini dalam waktu yang lebih lama.

Indonesia terletak di kawasan khatulistiwa. Sinar surya rata-rata adalah 4000-5000 Wj/m<sup>2</sup>, sedangkan rata-rata jumlah jam sinaran 4 hingga 8 jam. Indonesia mengalami jumlah hari hujan sekitar 170 hari pertahun dengan rata-rata suhu udara antara 26 sampai 32°C dan kelembaban relatif rata-rata 80 hingga 90% dan tidak pernah turun di bawah 60% [6].

Keadaan langit di kawasan tropik ini berawan, karena komponen sinar surya langsung kurang dari 40%. Dalam keadaan tertentu kadang lebih dari 1000 W/m<sup>2</sup>, tetapi hanya terjadi dalam waktu yang singkat.

a. Pemanfaatan Energi Matahari

Energi matahari merupakan salah satu energi yang potensial untuk dikelola dan dikembangkan lebih lanjut sebagai sumber cadangan energi terutama bagi negara-negara yang terletak di khatulistiwa termasuk Indonesia. Ada beberapa cara pemanfaatan energi panas matahari yaitu:

1. Pemanasan ruangan.
2. Penerangan ruangan.
3. Kompor matahari.
4. Pengeringan hasil pertanian.
5. Destilasi air kotor.
6. Pemanasan air.
7. Pembangkit listrik.

b. Potensi Energi Surya Untuk Pengembangan PLTS di Indonesia

Sebagai Negara tropis Indonesia mempunyai potensi energi surya yang tinggi. Berdasarkan data penyinaran matahari di Indonesia dapat diklasifikasikan berturut-turut sebagai berikut: untuk kawasan barat dan timur Indonesia dengan distribusi penyinaran di Kawasan Barat Indonesia (KBI) sekitar 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/hari dan di Kawasan Timur Indonesia (KTI) sekitar 5,1 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Dengan demikian, potensi matahari rata – rata Indonesia yaitu sebesar 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/hari [8]. Dengan berlimpahnya energi surya tersebut maka pengembangan listrik

tenaga surya yang berbasis panas matahari sebagai salah satu sumber tenaga listrik yang bebas polusi dan alami menjadi suatu pilihan yang tepat untuk diterapkan di Indonesia. Adapun alasan yang mendukung hal tersebut yakni:

1. Kondisi iklim di Indonesia yang sangat mendukung karena intensitas radiasi matahari di Indonesia relatif tinggi serta stabil, sehingga mendapat daya yang optimal sepanjang tahun.
2. Instalasi yang lebih sederhana dari pada pemasangan sumber energi terbarukan lainnya, sehingga memungkinkan pemanfaatan energi ini untuk kebutuhan listrik baik dalam skala kecil sampai skala besar.
3. Indonesia merupakan Negara kepulauan terdiri dari 13 ribu pulau sehingga membutuhkan waktu yang cukup lama untuk menyediakan jaringan pembangkit listrik pada setiap daerahnya hingga sampai ke tiap pelosok.
4. Dapat menjangkau seluruh pelosok Indonesia dengan ketersediaan radiasi surya yang merata sepanjang tahun. Energi matahari sistem dapat diinstal di lokasi terpencil sehingga lebih praktis dan hemat biaya.

**Tabel 2.1** Intensitas radiasi matahari di Indonesia

No	Kota	Provinsi	Radiasi Rata-Rata (KWh/m <sup>2</sup> )
1	banda Aceh	Aceh	4,1
2	Palembang	Sumatra Selatan	4,95
3	Menggala	Lampung	5,23
4	Rawasragi	Lampung	4,13
5	Jakarta	Jakarta	4,19
6	Bandung	Jawa Barat	4,15
7	Lembang	Jawa Barat	5,15
8	Citius, Tangerang	Jawa Barat	4,32
9	Darmaga, Bogor	Jawa Barat	2,56
10	Serpong, Tangerang	Banten	4,45
11	Semarang	Jawa Tengah	5,49
12	Surabaya	Jawa Timur	4,3
13	Kenteng, Yogyakarta	Yogyakarta	4,5
14	Denpasar	Bali	5,26
15	Pontianak	Kalimantan Barat	4,55
16	Banjarbaru	Kalimantan Selatan	4,8
17	Banjarmasin	Kalimantan Selatan	4,57
18	Samarinda	Kalimantan Timur	4,17
19	Manado	Sulawesi Utara	4,91
20	Palu	Sulawesi Tengah	5,51
21	Kupang	NTT	5,12
22	Waingapu	NTT	5,75
23	Maumere	NTT	5,7

c. Kalor, Kapasitas Kalor dan Kalor Jenis

Berbicara mengenai energi pada matahari yang dijadikan sebagai bahan bakar, maka akan merujuk pada istilah kalor, kapasitas kalor dan kalor jenis yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut. Di dalam fisika kalor didefinisikan sebagai suatu bentuk energi yang dapat berpindah atau mengalir dari benda yang memiliki kelebihan kalor menuju benda yang kekurangan kalor. Kalor biasanya dinyatakan dalam suhu. Satuan kalor di dalam satuan Internasional yaitu Joule, satuan

kalor lainnya ialah kalori. Satu kalori didefinisikan sebagai banyaknya kalor yang diperlukan untuk memanaskan sebanyak 1 kg air sebesar  $1^{\circ}\text{C}$ .

1 kalori = 4,2 Joule dan

1 joule = 0,24 kalori

Sedangkan kalor jenis ialah banyaknya kalor yang diserap atau diperlukan oleh 1 gram zat untuk menaikkan suhu sebesar  $1^{\circ}\text{C}$ . Kalor jenis juga diartikan sebagai kemampuan suatu benda untuk melepas atau menerima kalor. Masing-masing benda mempunyai kalor jenis yang berbeda-beda. Satuan kalor jenis  $\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ .

Kapasitas kalor diartikan sebagai banyaknya kalor yang diserap oleh suatu benda bermassa tertentu untuk menaikkan suhu sebesar  $1^{\circ}\text{C}$ . Satuan kapasitas kalor dalam sistem internasional yaitu  $\text{J}/\text{K}$ . Untuk mengetahui banyaknya kalor yang dilepas atau diterima oleh suatu zat digunakan persamaan berikut :

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

Dimana :

$Q$  = banyaknya kalor yang dilepas atau diterima oleh suatu benda (Joule)

$m$  = massa benda yang menerima atau melepas kalor (kg)

$c$  = kalor jenis zat ( $\text{J}/\text{Kg}^{\circ}\text{C}$ )

$\Delta T$  = perubahan suhu ( $^{\circ}\text{C}$ )

Untuk menentukan kalor jenis suatu zat digunakan persamaan :

$$c = Q / m \cdot \Delta T$$

Untuk menentukan kapasitas kalor suatu zat digunakan persamaan :

$$C = Q / \Delta T \quad (2.2)$$

Dimana :

C = kapasitas kalor (J/K)

Q = banyaknya kalor (J)

$\Delta T$  = perubahan suhu (C)

Kapasitas kalor juga dapat ditentukan dengan persamaan lain,

$$C = m \cdot c \quad (2.3)$$

Catatan :

Kapasitas kalor suatu benda biasanya bergantung pada suhu. Apabila perubahan suhu tidak terlalu besar maka kapasitas kalor dianggap tetap.

d. Daya masuk sinar

Daya yang masuk pada suatu benda dapat dihitung menggunakan persamaan.

$$P_{in} = \frac{Q}{t} \quad (2.4)$$

Dimana

$P_{in}$  = Daya masuk sinar (Watt)

Q = Kalor (Joule)

t = Waktu pemanasan (detik)

### 2.2.2 Mesin *Stirling*

*Stirling* adalah mesin kalor yang mengambil kalor dari luar silinder kerjanya. Sumber kalor apapun selama temperaturnya cukup tinggi, akan bisa menggerakkan motor ini. Secara prakteknya siklus *stirling* berbeda dengan siklus teoritik yang di dalamnya terdapat proses dua temperatur konstan dan dua volume konstan.

a. Sejarah Singkat Mesin *Stirling*

Mesin *stirling* ditemukan tahun 1816 oleh *Robert Stirling* (1790-1878). Saat itu disebut mesin udara dengan model mesin pembakaran luar siklus tertutup. Dia mematenkan temuan itu pada 27 September 1816 dan berlaku efektif 20 Januari 1817 atau ketika dia baru berumur 26 tahun.



**Gambar 2.1** Robert Stirling

Sejak awalnya mesin *Stirling* memiliki reputasi kerja yang baik dan masa kerja yang lama (di atas 20 tahun), antara lain digunakan sebagai mesin pompa air dengan kapasitas rendah, yaitu pada pertengahan abad ke-19 sampai sekitar tahun 1920, yaitu ketika mesin pembakaran internal dan motor listrik mulai menggantikannya.

Dalam perkembangannya, mesin *stirling* dapat digunakan sebagai pembangkit yang menggunakan pembangkit listrik yang menggunakan sumber energi terbarukan, seperti energi panas matahari. Konsep pemanfaatan energi matahari untuk mengoperasikan mesin *stirling* tidak dengan *photovoltaic* seperti yang sudah banyak ditemui di dunia global, tetapi dengan menggunakan *parabolic mirror dish* seperti tertera pada gambar di bawah.



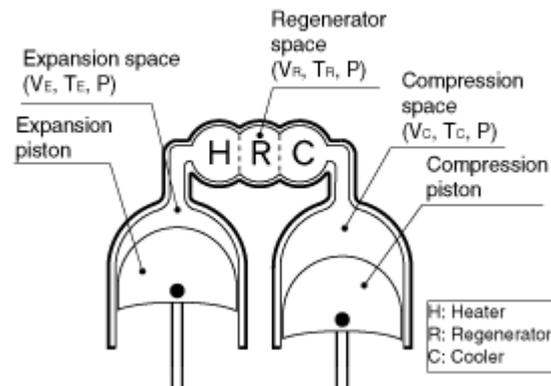
**Gambar 2. 2** Mesin *Stirling* Menggunakan *Parabolic Mirror Dish*

b. Jenis – Jenis Mesin *Stirling*

Berikut ulasan mengenai jenis mesin *stirling* berdasarkan oleh cara mereka memindahkan panas.

a) *Alpha Stirling*

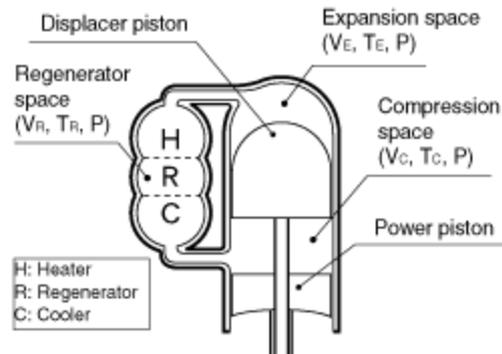
Mesin *stirling* alpha berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam *displacer* suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio *power-to-volume* tinggi, namun memiliki masalah teknis karena apabila suhu piston tinggi biasanya panas akan merambat ke pipa pemisah silinder. Dalam prakteknya, piston ini biasanya membawa isolasi yang cukup besar untuk bergerak jauh dari zona panas dengan mengorbankan beberapa ruang mati tambahan.



**Gambar 2.3** Mesin *stirling* tipe alpha

b) Beta *Stirling*

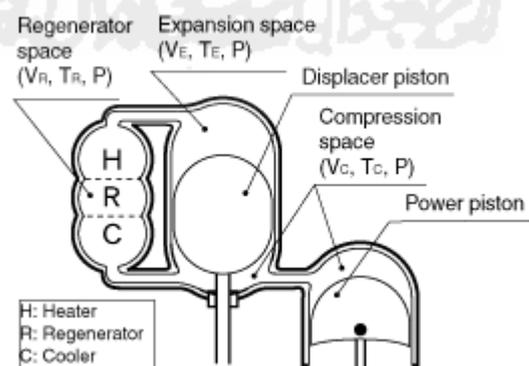
Mesin *stirling* beta memiliki piston daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai *displacer* piston. Silinder piston *displacer* yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Ketika silinder dipanaskan gas mendorong dan memberikan piston kekuatan. Ketika piston terdorong ke dingin (titik bawah) silinder mendapat momentum dari mesin, dan ditingkatkan dengan roda gila. Tidak seperti jenis alfa, jenis beta tidak akan menyebabkan isolator (pipa pemisah jika dalam bentuk alfa) menjadi panas.



**Gambar 2.4** Mesin *stirling* tipe beta

c) *Gamma Stirling*

Mesin *Stirling* gamma hanyalah sebuah mesin *Stirling* beta, di mana piston tenaga sudah terpasang di dalam silinder yang terpisah samping silinder piston *displacer*, tapi masih terhubung ke roda gila sama. Gas dalam dua silinder dapat mengalir bebas karena mereka berada dalam satu tubuh. Konfigurasi ini menghasilkan rasio kompresi lebih rendah, tetapi mekanis ini cukup sederhana dan sering digunakan didalam mesin *Stirling* multi-silinder.

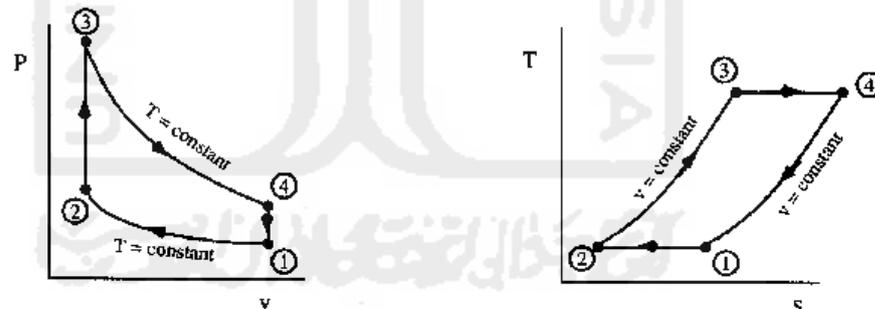


**Gambar 2.5** Mesin *stirling* tipe gamma

c. Siklus *Stirling*

- Siklus *Stirling* Ideal

Pada gambar berikut memperlihatkan siklus stirling ideal. Siklus ini terdiri dari empat proses yang dikombinasikan menjadi siklus tertutup yaitu dua proses isothermal dan dua proses isokhorik. Proses-proses tersebut ditunjukkan pada diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-s). Luas area didalam diagram siklus stirling tersebut adalah kerja indikator yang dihasilkan dari siklus tersebut. Kerja dihasilkan oleh siklus hanya dihasilkan dari proses isothermal saja. Untuk memfasilitasi kontinuitas kerja dari dan menuju sistem, sebuah roda gila harus diintergrasikan dalam rancangan mesin *stirling*. Roda gila sebagai *storage device* untuk energi. Dalam siklus ini, panas harus ditransmisikan dalam seluruh prosesnya.



**Gambar 2.6** Siklus ideal mesin stirling dalam diagra P-V T-s

Kerja yang dihasilkan dari siklus *stirling* tertutup ideal direpresentasikan oleh area 1-2-3-4 pada diagram P-V. Dari hukum termodinamika pertama, kerja output harus sama dengan panas input yang representasikan pada area 1-2-3-4 pada diagram T-S.

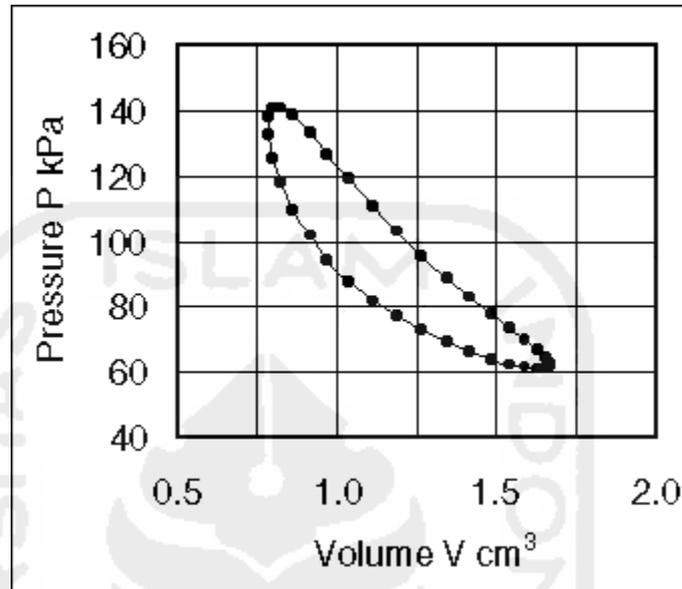
- Siklus Mesin *Stirling* Sebenarnya

Siklus *stirling* sebenarnya ditunjukkan pada gambar di bawah. Seperti yang dapat dilihat, kerja selama proses 2-3 dan 4-1, tidak seperti prediksi siklus ideal. Salah satu penyebabnya adalah regenerator pada mesin *stirling* menambah gesekan pada aliran fluida.

Penyebab lain yang menyebabkan inefisiensi dari siklus *stirling* sebenarnya yaitu tidak seluruh fluida kerja berpartisipasi dalam siklusnya, contohnya yaitu fluida kerja yang berada dalam volume sisa. Volume sisa akan selalu ada karena adanya regenerator, *clearance*, pipa saluran yang diperlukan untuk meningkatkan pertukaran kalor pada sistem sebenarnya. Meskipun begitu siklus *stirling* tersebut dapat dianalisis menggunakan prinsip-prinsip termodinamika, analisis tersebut sebagai perumpamaan dari mesin *stirling* sebenarnya.

Dalam proses pembuatan sebuah model mesin *stirling*, dibutuhkan proses perancangan. Proses perancangan tersebut meliputi proses perhitungan termodinamika yang nantinya dijadikan acuan dalam perancangan elemen mesin, pemilihan bahan dan penentuan dimensi dari model mesin *stirling* tersebut. Salah satu yang biasa digunakan sebagai pendekatan model termodinamika mesin *stirling* adalah teori *Schmidt*. Teori *Schmidt* yang dipergunakan dalam penelitian ini merupakan teori *Schmidt* yang dipublikasikan oleh *Koichi Hirata*, seorang ilmuwan asal Jepang. Teori *Schmidt* adalah salah satu metode perhitungan yang paling sederhana dan sangat berguna untuk pengembangan mesin *stirling*. Teori ini berdasarkan pada ekspansi isothermal dan kompresi gas ideal.

Performa mesin dapat dihitung menggunakan diagram P-V. Volume pada mesin dengan mudah dapat dihitung menggunakan *internal geometry* [7].



**Gambar 2.7** Diagram P-V

Ketika volume, massa kerja gas dan temperatur ditetapkan, tekanan dapat dihitung dengan menggunakan metode gas ideal seperti yang ditunjukkan dalam persamaan.

$$PV = mRT \quad (2.5)$$

Dimana :

P = Tekanan (Pa)

V = Volume (m<sup>3</sup>)

m = Massa (Kg)

R = Konstanta gas ideal (J.K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>)

T = Suhu (°C)

Parameter-parameter mesin *stirling* dapat dihitung dengan menggunakan asumsi – asumsi sebagai berikut :

- a. Tidak ada kehilangan tekanan di *heat-exchanger* dan tidak ada perbedaan tekanan internal.
- b. Proses ekspansi dan proses kompresi isothermal perubahan.
- c. Kondisi gas bekerja berubah sebagai gas ideal.
- d. Ada regenerasi sempurna
- e. Perluasan ruang mati mempertahankan suhu gas ekspansi - TE, kompresi ruang mati.

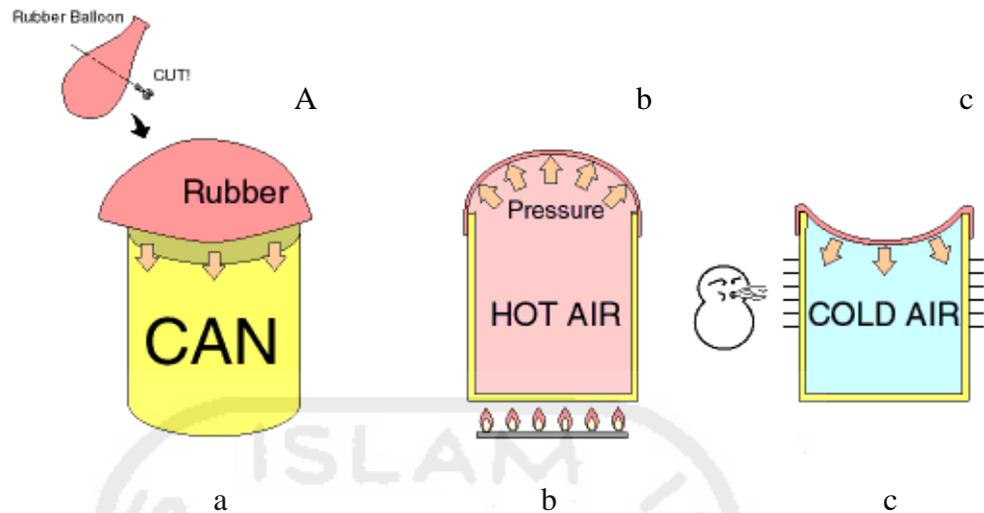
**Tabel 2.2** Simbol yang digunakan *Schmidt Teory*

Nama	Simbol	Unit
Tekanan mesin	P	Pa
Piston displeser	$V_{SE}$	$m^3$
Piston tenaga	$V_{SC}$	$m^3$
Volume hampa pada ruang ekspansi	$V_{DE}$	$m^3$
Volume regenerator	$V_R$	$m^3$
Volume hampa pada ruang kompresi	$V_{DC}$	$m^3$
Volume momental pada ruang ekspansi	$V_E$	$m^3$
Volume momental pada ruang kompresi	$V_C$	$m^3$
Total volume momental	V	$m^3$
Total massa kerja gas	M	Kg
Gas konstan	R	J/kgK
Suhu gas Ruang ekspansi	$T_H$	K
Suhu gas ruang kompresi	$T_C$	K
Suhu gas ruang regenerator	$T_R$	K
Sudut fase	$D_x$	Deg
Rasio suhu	T	
Rasio volume dorong	V	

Nama	Simbol	Unit
Rasio volume hampa	X	
Kecepatan mesin	N	Hz
Indikasi ekspansi energi	$W_E$	J
Indikasi kompresi energi	$W_C$	J
Indikasi energy	$W_i$	J
Indikasi ekspansi tenaga	$L_E$	W
Indikasi kompresi tenaga	$L_C$	W
Indikasi tenaga	$L_i$	W
Efisiensi	E	

d. Prinsip Kerja Mesin *Stirling*

Cara kerja mesin ini memanfaatkan sifat dasar dari udara yang akan memuai jika dipanaskan dan akan menyusut jika didinginkan. Dengan demikian akan terjadi siklus pemuaihan dan penyusutan sehingga sebuah mesin akan berkerja. Dari definisi tadi dapat ditarik kesimpulan bahwa sebuah mesin *stirling* akan bekerja jika terdapat perbedaan temperatur. Perbedaan tersebut mengakibatkan adanya perbedaan tekanan yang akhirnya menghasilkan ekspansi dari fluida kerjanya. Ekspansi inilah yang dimanfaatkan untuk dikonversi menjadi kerja oleh piston yang kemudian dihubungkan ke poros engkol (*crankshaft*) agar menjadi kerja mekanik. Poros engkol ini kemudian dihubungkan ke roda gila agar dapat terjadi siklus selanjutnya.



**Gambar 2.8** (a)Udara dalam keadaan tekanan atmosfer, (b) dipanaskan dan (c) didinginkan

e. Perhitungan temperatur sisi dingin dan sisi panas

Perlu diketahui nilai temperatur yang ada pada sisi yang terkena sinar atau sisi panas dan sisi tempat dinginnya. Hal ini agar menjaga mesin tetap dapat berputar. Karena jika suhunya terlalu tinggi maka siklus pemuaihan dan penyusutan sebuah mesin tidak akan berkerja. Untuk mengetahui perbedaan temperturnya digunakan persamaan.

$$\Delta T = T_{\text{sisi panas}} - T_{\text{sisi dingin}} \quad (2.6)$$

Dimana :

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{sisi panas}}$  = Temperatur sisi panas ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{sisi dingin}}$  = Temperatur sisi dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )

f. Perhitungan torsi pada *flywheel*

Paramater penting dalam motor bakar baik itu motor bakar pembakaran internal maupun motor bakar pembakaran eksternal adalah torsi dan daya

mesin, alasannya karena kedua parameter ini adalah penentu performa atau unjuk kerja mesin.

Torsi adalah ukuran kemampuan mesin untuk melakukan kerja, jadi torsi adalah suatu energi. Besaran torsi adalah besaran turunan yang biasa digunakan untuk menghitung energi yang dihasilkan dari benda yang berputar pada porosnya dalam hal ini adalah *flywheel*. Torsi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$T = I\alpha \quad (2.7)$$

Dimana :

T = Torsi (Nm)

I = Momen inersia (Kg m<sup>2</sup>)

$\alpha$  = Percepatan sudut (rad/sec<sup>2</sup>)

g. Perhitungan daya yang dihasilkan mesin *stirling*

Setelah mendapatkan nilai torsi barulah kita dapat menghitung besar daya yang dapat dihasilkan oleh mesin *stirling* tersebut. Besar daya tersebut dapat diketahui menggunakan persamaan berikut.

$$P = \frac{2\pi nT}{60} \quad (2.8)$$

Dimana :

P = Daya maksimum (Watt)

T = Torsi (Nm)

n = RPM maksimum

h. Efisiensi mesin *stirling*

Idealnya efisiensi adalah perbandingan kerja yang dihasilkan terhadap energi yang diberikan terhadap sistem. Dalam hal ini adalah daya yang dihasilkan mesin *stirling* terhadap energi sinar matahari sebagai sumber pemanasnya. Oleh karena itu efisiensi mesin *stirling* dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$\eta = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} 100\% \quad (2.9)$$

Dimana:

$\eta$  = Efisiensi

$P_{\text{in}}$  = Daya masuk (Watt)

$P_{\text{out}}$  = Daya keluar (Watt)