

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Pustaka

Yuliyani dan Irwan telah melaksanakan pembuatan serta pengujian prototipe mesin stirling tipe gamma, yang didasarkan pada teori Schmidt. Hasil pengujian tersebut mencakup parameter-parameter berikut: volume silinder panas sebesar 113,04 cm³ dengan volume sisa 14,13 cm³, dan diameter silinder panas sebesar 6 cm. Sementara itu, volume silinder dingin adalah 78,5 cm³ dengan volume sisa 1,963 cm³, dan diameter silinder dingin sebesar 5,4 cm. Berdasarkan pengujian yang dilakukan pada prototipe mesin stirling, ditemukan bahwa mesin mampu mencapai kecepatan putaran maksimum sebesar 910 rpm tanpa beban, dan 349,3 rpm saat beban diterapkan, menghasilkan torsi sebesar 0,038 Nm. Mesin stirling mulai berputar saat silinder pada sisi panas dipanaskan hingga suhu 300°C menggunakan sumber panas dari spirtus. Mesin tersebut dapat berputar selama waktu yang diperlukan agar panas dari spirtus dapat dipertahankan, yakni sekitar 10 menit. (Yuliyani and Irwan, 2013).

Dalam penelitiannya mengenai sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan tenaga panas yang dihasilkan matahari berbasis mesin stirling untuk digunakan dalam rumah tangga, Syafriyudin dan rekannya menemukan bahwa temperatur reflektor berhubungan langsung dengan temperatur silinder panas. Mereka mencatat bahwa reflektor aluminium mampu memantulkan panas matahari ke silinder panas dengan efisiensi yang baik (Syafriyudin *et al.*, 2013).

Alfiyanti telah mengembangkan dan memproduksi mesin stirling tenaga surya yang menggunakan pemanas matahari berbentuk kotak untuk menghasilkan listrik.. Pendekatan eksperimental dilakukan dengan menguji desain mesin stirling tersebut. Efisiensi diukur dengan membandingkan output kerja dengan input panas. Efisiensi tertinggi mencapai 12,1%, dicapai pada intensitas matahari 834 w/m² dengan perbedaan suhu 120°C. Pada situasi

tersebut, mesin mampu mencapai kecepatan rotasi 139 rpm dengan daya generator 0,004 Watt (Alfianti, 2016).

Bhagat dan kawan-kawan memberikan pendekatan desain dan analisis termodinamika pada pembuatan model stirling menggunakan energi matahari. Tipe yang dipilih adalah tipe alpha karena lebih mudah dalam proses pembuatannya. Konsentrator surya parabola digunakan untuk memberikan panas pada mesin (Bhagat *et al.*, 2016).

Roldan dan kawan-kawan menjalankan penelitian yang terdiri dari desain konseptual dan dasar prototipe mesin stirling dengan tujuan memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Penelitian dimulai dengan tinjauan yang mencakup aspek sejarah, fungsi dasar, konfigurasi desain, aplikasi dan metode analisis, kemudian dilanjutkan dengan konseptual desain, di mana spesifikasi prototipe ditentukan. Hasil yang didapatkan, dimensi dasar dari komponen penting adalah penukar panas (pemanas, pendingin, dan regenerator), piston, pemindah dan kolektor surya. Kesimpulannya adalah bahwa metode analisis yang berbeda mempunyai ketidaksamaan di antara yang dihasilkan, artinya sebuah konstruksi dari prototipe diperlukan untuk memahami fenomena kompleks yang terjadi di dalam mesin (Roldan, Pieretti and Rojas-Solorzano, 2010).

Gehlot dan kawan-kawan melakukan pendekatan baru untuk mengembangkan dan membuat mesin stirling tipe alpha dengan tujuan membangun prototipe yang berfungsi. Siklus Stirling diubah menjadi sistem dinamis yang memungkinkan penerapan teknik kontrol desain dan peralatan untuk menentukan parameter manufaktur yang optimal untuk mesin. Mesin stirling jenis alpha ini dibangun oleh dua mesin diesel kirloskar yang tidak digunakan karena satu adalah untuk silinder daya dan yang lainnya untuk silinder yang didinginkan. Keduanya digabungkan dengan dua cara yaitu satu adalah kopling fleksibel dan lainnya adalah pemegang injector untuk penukar panas dengan pipa tekanan. Mesin jenis ini memiliki rasio daya terhadap volume yang tinggi (Gehlot, Nigam and Marmat, 2014).

Siddiqui dan kawan-kawan melakukan penelitian ini dengan mengeksplorasi dampak sudut fasa terhadap kinerja mesin Stirling tipe beta, dengan premis bahwa sudut tersebut merupakan faktor kunci dalam efisiensi mesin tersebut. Sudut fasa merujuk pada sudut di mana perubahan volume ruang ekspansi menuju ruang kompresi terjadi dalam siklus mesin Stirling. Siddiqui et al. mengoptimalkan dan memodelkan sudut fasa pada mesin Stirling beta tunggal menggunakan helium sebagai fluida kerja. Mereka menerapkan analisis Schmidt untuk mengevaluasi efisiensi mesin dengan memvariasikan volume dan tekanan pada berbagai nilai sudut fasa selama siklus operasi lengkap. (Siddiqui *et al.*, 2015).

Satria dan timnya menginovasi mesin Stirling tipe alpha dengan mengubah sudut fasa menjadi 180 derajat. Tujuannya adalah untuk mengurangi dampak gravitasi saat kompresi silinder dingin. Sebelumnya, sudut fasa 90 derajat membuat silinder dingin tegak lurus ke atas, sehingga proses kompresi harus melawan gravitasi. Penelitian menunjukkan bahwa varian desain optimal adalah varian 5, yang menggunakan kompor biomassa sebagai sumber panas dan sistem pulley dan belt untuk mentransfer daya secara langsung. Pilihan ini didasarkan pada kesesuaian dengan spesifikasi yang diinginkan. Penggunaan kompor biomassa dipilih karena termasuk dalam kategori bahan bakar alternatif. Sementara itu, sistem pulley dan belt dipilih karena menghasilkan suara yang lebih rendah dibandingkan dengan sprocket dan rantai. Penggunaan daya output secara langsung dipilih karena konstruksinya lebih sederhana dan efisiensi energinya lebih optimal. (Satria *et al.*, 2019).

Satria dan timnya melakukan studi mengenai analisis kinerja mesin Stirling tipe alpha dengan inovasi desain sudut fasa 180 derajat. Mereka menggunakan metode Schmidt, sebuah metode perhitungan isothermal yang berdasarkan ekspansi dan kompresi gas ideal untuk mesin Stirling. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerja total per siklus adalah 9.43 Joule, dengan kalor yang diserap sebesar 18.47 Joule dan kalor yang dibuang sebesar 9.04 Joule. Efisiensi termal mesin Stirling yang dihasilkan adalah 51%. (Satria *et al.*, 2020). Kekurangan dari penelitian ini adalah pipa generator yang memiliki

panjang yang berlebihan, menyebabkan banyaknya kehilangan energi atau panas (heat loss), serta rendahnya kecepatan kompresi dalam ruang bakar.

2.2 Mesin Stirling (*Stirling Engine*)

2.2.1 Definisi Mesin Stirling

Mesin stirling adalah sebuah mesin yang prinsip kerjanya berdasarkan prinsip peredaran termodinamika. Sumber kalor apapun yang dipakai selama temperaturnya cukup tinggi, maka bisa menggerakkan mesin stirling. Mesin stirling termasuk ke dalam mesin pembakaran luar. Dalam implementasinya, siklus Stirling berbeda dari model teoritis yang melibatkan dua proses dengan temperatur konstan dan dua proses dengan volume konstan,

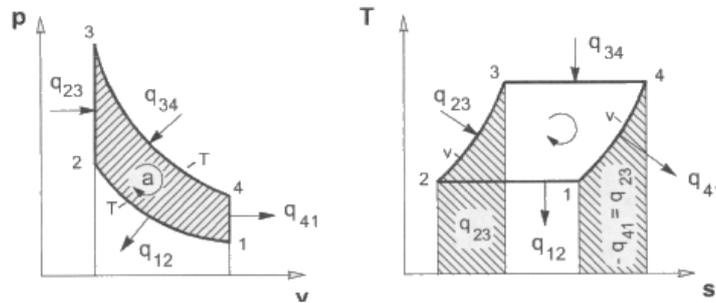
2.2.2 Prinsip Kerja Mesin Stirling

Prinsip dasar kerja mesin Stirling melibatkan ekspansi gas saat dipanaskan di dalam silinder yang panas, diikuti dengan proses kompresi gas saat didinginkan di dalam silinder yang dingin. Gas-gas ini bergerak secara kontinu antara bagian panas dan dingin. Perpindahan gas terjadi melalui piston displacer yang bertugas sebagai perantara gas antara kedua bagian, Volume internal diubah melalui ekspansi dan kontraksi gas oleh daya piston, yang juga dikenal sebagai regenerator untuk mengembalikan udara.

2.2.3 Siklus Ideal Mesin Stirling

Siklus ideal mesin Stirling terdiri dari empat proses yang membentuk siklus tertutup, termasuk dua proses isothermal dan dua proses isochoric. Proses-proses ini direpresentasikan dalam diagram tekanan-volume (P-V) dan diagram temperatur-entropi (T-s). Luas area di dalam diagram siklus Stirling tersebut menunjukkan kerja indikator yang dihasilkan dari siklus tersebut, yang hanya berasal dari proses isothermal. Untuk menjaga kontinuitas kerja dalam sistem, flywheel harus dimasukkan dalam desain mesin Stirling. Flywheel berperan

sebagai perangkat penyimpan energi. Dalam siklus ini, panas harus dialirkan melalui semua prosesnya.



Gambar 2.1 Siklus Ideal Mesin Stirling

Luas area 1-2-3-4 dalam diagram P-V menunjukkan hasil kerja dari siklus Stirling ideal tertutup. Berdasarkan Hukum Kesatu Termodinamika, kerja output harus sebanding dengan panas input yang tercermin dalam area 1-2-3-4 pada diagram T-S. Regenerator dipakai untuk menyerap panas dari fluida kerja selama proses 4-1 dan mengembalikan panas tersebut saat proses 2-3. Siklus Carnot menggambarkan efektivitas teoritis pada sebuah siklus termodinamika. Proses siklus ideal mesin *stirling* :

A. Proses 1-2 : kompresi *isothermal*

Dengan efisiensi yang baik, piston di silinder panas menghasilkan kerja pada fluida dan mengkompresinya secara isothermal pada temperatur dingin, sementara juga melepas kalor ke lingkungan. Pada saat yang sama, karena tekanan fluida kerja rendah, diperlukan kerja yang lebih besar untuk melakukan kompresi daripada yang dihasilkan pada proses ekspansi.

B. Proses 2-3 : kompresi *isokhoric*

Torak memindahkan udara kerja melalui regenerator secara isokhorik menuju silinder panas. Panas diserap oleh fluida kerja saat gas melewati regenerator, menyebabkan kenaikan suhu fluida kerja saat memasuki ruang panas.

C. Proses 3-4 : Ekspansi *Isothermal*

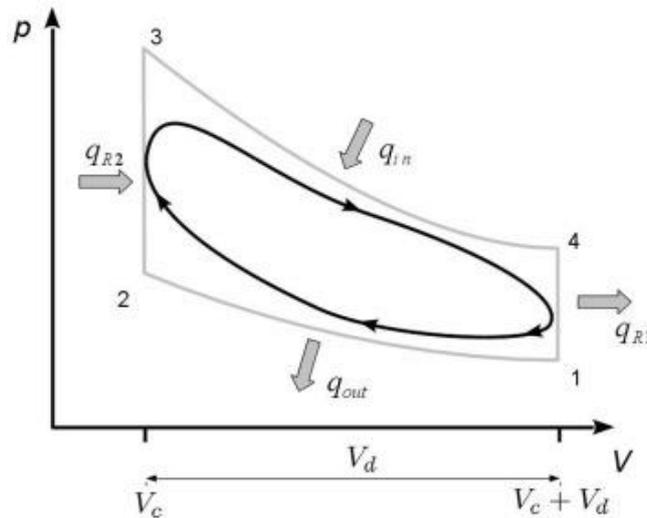
Udara yang berada dalam *high pressure* menahan panas dari wilayah panas dan mengalami ekspansi secara isothermal, sehingga menghasilkan kerja padtorak.

D. Proses 4-1 : Ekspansi *Isokhoric*

Torak yang mengalami ledakan mengalihkan udara kerja secara isokhorik melalui regenerator kebagian dingin (ruang dingin) mesin. Saat udara kerja melintasi regenerator, panas diserap oleh fluida tersebut, sehingga mengakibatkan penurunan suhu fluida kerja saat menuju silinder dingin.

2.2.4 Siklus Aktual Mesin Stirling

Gambar 2.5 menunjukkan siklus aktual dari mesin Stirling. Dapat dilihat bahwa terdapat proses 2-3 dan 4-1, yang berbeda dengan perkiraan pada siklus ideal. Faktor yang menyebabkan ketidaksempurnaan adalah penggunaan regenerator pada mesin Stirling; inklusi regenerator meningkatkan gesekan pada aliran fluida kerja.



Gambar 2.2 Siklus Aktual Mesin Stirling

Faktor lain adalah bahwa tidak semua fluida kerja terlibat dalam siklusnya, seperti yang terjadi pada volume yang tersisa. Martini (2004) menyatakan bahwa ada keterkaitan linear antara persentase volume tersisa didalam sistem dengan penurunan kerja setiap siklus. Dengan hal

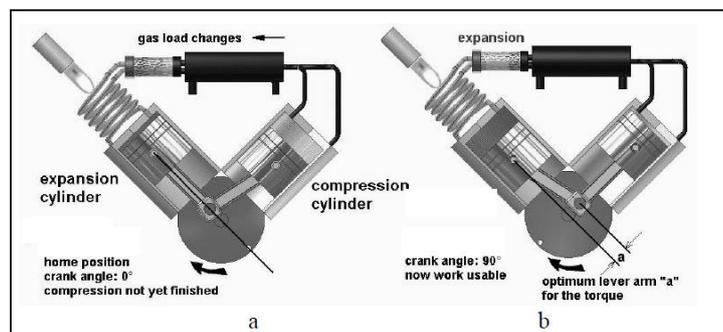
itu, jika sebuah mesin stirling mempunyai 20% volume sisa, maka kerja *output* akan 80% dari kerja apabila tidak ada volume sisa. Pada kenyataannya, volume sisa akan selalu ada, karena adanya regenerator, *clearances*, pipa saluran, yang diperlukan untuk meningkatkan pertukaran kalor pada sistem sebenarnya. Meskipun begitu, siklus stirling yang ideal dapat dianalisis menggunakan prinsip-prinsip termodinamika, analisis tersebut sebagai perkiraan dari mesin stirling sebenarnya.

2.2.5 Jenis-jenis Mesin Stirling

Mesin stirling dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu sebagai berikut.

A. Mesin Stirling Tipe Alpha

Mesin *Stirling* dengan type alpha menggunakan *double* piston yang beroperasi didalam dua silinder yang terpisah, yang dimana satu berada dalam silinder dingin dan yang lainnya dalam silinder panas. Mesin Stirling ini merupakan mesin dari dua silinder yang ditempatkan dengan sudut diantara keduanya, yaitu ruang panas (ekspansi) dan ruang dingin (kompresi). Dikaarenakan gerkannya membentuk sudut 90° , mesin Stirling type alpha ini sering dikatakan sebagai *alpha stirling V-engine*. Pada ilustrasi di bawah, silinder panas terletak di sisi kiri, dipanaskan oleh api dari pembakar. Sementara itu, silinder dingin terlihat di sisi kanan dalam gambar, dengan regenerator terletak di antara dua pipa generator, yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi.



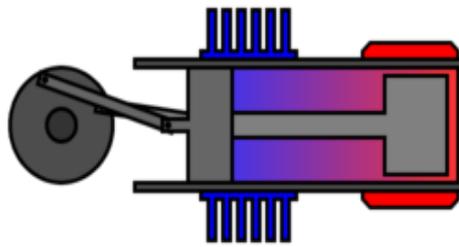
Gambar 2.3 Mesin Stirling Tipe Alpha

Pada gambar 2.3 (a) titik mati atas (TMA) dilakukan oleh piston yang berada pada silinder panas, karena roda gila (*flywheel*) memberikan gaya awalan sebagai momentum awal pada sistem yang bergerak awal sepanjang 90° , maka piston pada silinder panas bergerak menuju TMB dan udara piston pada silinder dingin bergerak menuju TMA yang ditunjukkan pada gambar 2.3 (b). Udara yang berada pada silinder dingin mengalir menuju regenerator, dan udara pada regenerator mengalir menuju pipa silinder yang dipanaskan sehingga menghasilkan udara panas.

Kemudian ketika roda gila (*flywheel*) bergerak sejauh 180° piston pada silinder panas bergerak kembali menuju TMA yang mendorong udara panas menuju silinder dingin, sehingga timbul aliran dari suhu tinggi menuju suhu yang rendah. Hal ini diharapkan terjadi siklus yang berulang dengan adanya bantuan gaya awalan atau momentum roda gila (*flywheel*) dan terjadi perpindahan suhu secara terus menerus dari silinder panas menuju silinder dingin karena perbedaan temperatur yang dimaksimalkan oleh regenerator.

B. Mesin Stirling (*Stirling Engine*) Tipe Beta

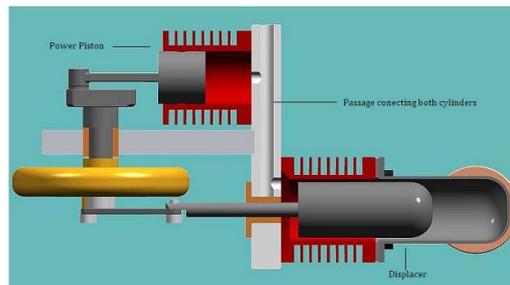
Mesin Stirling tipe beta terdapat torak tunggal yang berfungsi dalam satu ruang yang sama dengan piston displacer, keduanya terletak pada poros yang sama. Silinder piston displacer yang longgar digunakan untuk mengalirkan gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Saat silinder dipanaskan, gas memberikan dorongan pada piston. Ketika piston didorong ke daerah dingin (titik terendah), mesin mendapatkan momentum, yang kemudian diperkuat dengan flywheel. Berbeda dengan tipe alpha, tipe beta tidak berdampak isolator (seperti pipa pemisah pada jenis alpha) menjadi panas.



Gambar 2.4 Mesin Stirling Tipe Beta

C. Mesin Stirling Tipe Gama

Mesin Stirling tipe gamma merupakan varian dari mesin Stirling beta, di mana piston power dipasang di dalam silinder terpisah, bersebelahan dengan silinder piston displacer, namun masih terhubung dengan flywheel. Gas dalam kedua silinder dapat mengalir secara bebas karena keduanya berada dalam satu kesatuan. Mesin ini memiliki rasio kompresi yang lebih rendah, tetapi memiliki mekanisme yang sederhana dan sering digunakan dalam mesin Stirling multisilinder.



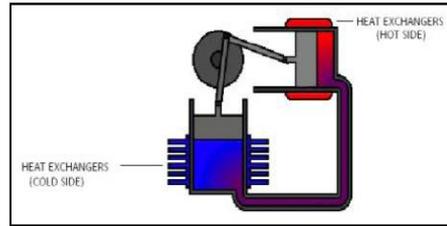
Gambar 2.5 Mesin Stirling Tipe Gama

2.2.6 Bagian-Bagian Utama Mesin Stirling

Bagian-bagian utama pada mesin stirling yaitu sebagai berikut.

A. *Heat Exchanger*

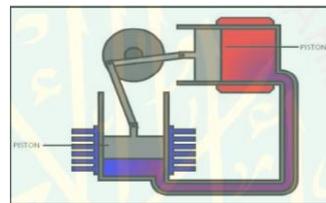
Heat Exchanger adalah suatu komponen pada mesin yang berfungsi sebagai penukar panas dari suatu medium ke medium yang lainnya untuk menjaga konsistensi suhu panas dan dingin yang berada pada silinder mesin.



Gambar 2.6 *Heat Exchanger* (Walker and Khan, 1965)

B. Piston

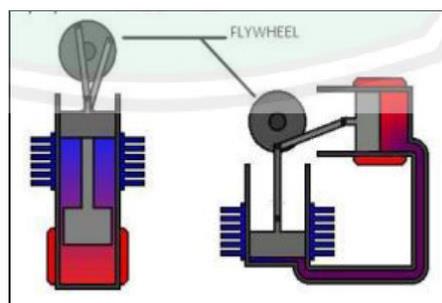
Piston merupakan komponen yang bisa bergerak dari pada satu titik mati atas ke titik mati bawah untuk mencapai suatu kerja tertentu.



Gambar 2.7 *Piston* (Walker and Khan, 1965)

C. Flywheel

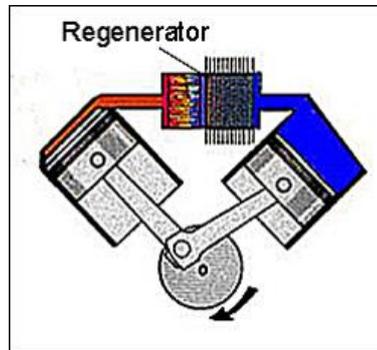
Flywheel adalah suatu massa inersia yang menggabungkan torak dan displacer (jika ada). Seperti yang kita ketahui, hanya ada satu gaya yang beroperasi, dan saat bergerak flywheel mengumpulkan energi yang kemudian menjadi energi kinetik rotasi, menyebabkan peningkatan kecepatan flywheel. Ketika semua energi kinetik flywheel telah digunakan, kecepatannya akan mulai menurun. Karena itu, flywheel mengurangi variasi kecepatan mesin dan juga menyediakan daya untuk gerakan lainnya.



Gambar 2.8 *Flywheel* (Walker G, 1965)

D. Regenerator

Meskipun siklus teoritis sebuah mesin Stirling dapat beroperasi tanpa regenerator, namun penting untuk memperhatikan efisiensi mesin Stirling. Saat udara berpindah dari silinder dingin ke silinder panas, proses pemanasan dari awal harus dialami oleh udara sebelum ekspansi kembali untuk menghasilkan kerja. Demikian pula, fluida yang mengalir ke ruang dingin mengalami fenomena pendinginan dari suhu yang tinggi sebelum mengalami kompresi. Namun, jika udara yang mengalir ke ruang panas dapat dipanaskan sebelumnya (*pre-heating*) dan fluida yang bergerak ke silinder dingin dapat didinginkan sebelumnya (*pre-cooling*), kemudian efisiensi mesin bisa ditingkatkan.



Gambar 2.9 Regenerator

Dalam motor Stirling tipe alpha, regenerator dapat diimplementasikan sebagai pipa yang ditempatkan di antara silinder panas dan silinder dingin, dengan wire mesh di dalamnya. Ketika udara mengalir dari silinder panas melalui regenerator, udara tersebut menyerap panas dan menyimpannya di wire mesh. Meskipun udara tidak menjadi dingin seperti yang diharapkan, namun energi panas tetap disimpan di wire mesh. Saat udara kembali ke silinder panas, piston di silinder dingin mendorongnya (pada mesin Stirling tipe alpha), sehingga udara yang sebelumnya telah didinginkan menyerap kembali energi panas yang tersimpan di wire mesh, menciptakan efek *pre-heating*.

Dari penjelasan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa jumlah panas yang dibutuhkan dari sumber panas tidak perlu sebanyak pada tahap pemanasan awal. Hal ini dapat meningkatkan efisiensi mesin. Oleh karena itu, penting untuk memilih material untuk pengisi regenerator, seperti wire-mesh dengan material yang memiliki thermal capacitance yang cukup besar.

2.3 Teori Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah suatu proses berpindahnya energi kalor dari suatu daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah, hingga dicapai kesetimbangan termal. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.3.1 Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah proses perpindahan panas dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah melalui zat perantara (padat, cair, atau gas)

Laju perpindahan panas dalam konduksi berkaitan langsung pada perbandingan suhu, yang sama dengan perhitungan Dasar Konduksi.:

$$qk = kA \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2.1)$$

Ket :

q = Laju Perpindahan Kalor (kj / det,W)

k = Konduktifitas Termal/Kalor (W/m.°C)

A = Luas Penampang/Area (m²)

dT = Perbedaan/ delta Temperatur (°C, °F)

dX = Perbedaan/delta Jarak (m / det)

ΔT = Perubahan/ delta Suhu (°C, °F)

dT/dx = gradient temperatur kearah perpindahan kalor.

Konstanta atau nilai positif "k" dikenal sebagai konduktivitas atau konduktans termal dari suatu benda, sedangkan tanda minus digunakan untuk mematuhi hukum kedua termodinamika, yang menyatakan bahwa

panas akan mengalir dari tempat yang lebih tinggi ke tempat yang lebih rendah dalam skala suhu. (J.P. Holman, hal: 2)

Hukum dasar pada aliran panas atau kalor melalui konduksi melibatkan perbandingan antara laju aliran panas melalui permukaan isothermal dan gradien suhu di atas permukaan tersebut pada setiap titik dalam suatu benda selama periode waktu tertentu, yang dikenal sebagai hukum Fourier. Dalam penerapan Hukum Fourier (Persamaan 2.1) pada suatu dinding datar, hasil integrasi dari persamaan tersebut akan menghasilkan:

$$qk = -\frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (2.2)$$

(J.P. Holman, hal: 26)

Pada persamaan 2.1 dan 2.2, Laju perpindahan panas terjadi di akibatkan oleh nilai konduktivitas thermal (K) suatu ma. selanjutnya adalah nilai konduktivitas thermal untuk jenis-jenis bahan pada suhu 0°C. (Giancoli,2001)

Tabel 2.1 Konduktivitas Termal

Zat	Konduktivitas Termal, <i>k</i>	
	kkal/s.m.°C	J/s.m°C
Perak	10 x 10 ⁻²	420
Tembaga	9,2 x 10 ⁻²	380
Aluminium	5,0 x 10 ⁻²	200
Baja	1,1 x 10 ⁻²	40
Es	5 x 10 ⁻⁴	2
Gelas (biasa)	2,0 x 10 ⁻⁴	0,84
Batu bata dan beton	2,0 x 10 ⁻⁴	0,84
Air	1,4 x 10 ⁻⁴	0,56
Jaringan tubuh manusia (tidak termasuk darah)	0,5 x 10 ⁻⁴	0,2
Kayu	0,2 - 0,4 x 10 ⁻⁴	0,08-0,16
Isolator fiberglass	0,12 x 10 ⁻⁴	0,048
Gabus dan serat kaca	0,1 x 10 ⁻⁴	0,042
Bulu angsa	0,06 x 10 ⁻⁴	0,025
Busa polyurethane	0,06 x 10 ⁻⁴	0,024
Udara	0,055 x 10 ⁻⁴	0,023

2.3.2 Konveksi

Konveksi merupakan suatu kejadian perpindahan panas dengan menyertakan bergeraknya suatu molekul pada satu titik terhadap titik lainnya (Giancoli, 2001). Hukum pendinginan Newton dapat digunakan untuk menyatakan laju perpindahan panas, yang dirumuskan sebagai berikut (Koestoer, 2002) :

$$Q_{conv} = h \cdot A_s (T_s - T_{\infty}) \dots \dots \dots (2.3)$$

- Dimana :
- h = koefisien perpindahan panas konveksi (W/m².C)
 - A_s = luas permukaan perpindahan panas (m²)
 - T_s = temperatur permukaan (°C)
 - T_{∞} = temperatur lingkungan (°C)

Terdapat dua mekanisme perpindahan kalor secara konveksi ini, adalah:

1. Konveksi Alamiyah (*Natural Convection*)
Konveksi alamiyah yaitu perpindahan kalor konveksi yang terjadi karena pergerakan molekul yang disebabkan karena perbedaan massa jenis dari suatu fluida.
2. Konveksi Paksa (*Forced Convection*)
Konveksi paksa adalah proses perpindahan panas konvektif yang dipicu oleh gaya eksternal yang menyebabkan pergerakan molekul dalam fluida tertentu. Perbedaan suhu antara permukaan spesimen dan aliran udara menghasilkan variasi temperatur dari T_s pada $T_s=0y=0$ hingga w pada aliran yang paling luar. Daerah ini dikenal sebagai lapisan batas termal. (Cengel, 2002).

2.3.3 Radiasi

Radiasi adalah proses transfer panas yang tidak melibatkan perantara material. Biasanya terjadi melalui gelombang elektromagnetik atau kumpulan energi (foton) yang dapat menyebar hingga jarak yang sangat jauh tanpa memerlukan interaksi langsung dengan medium. Selain itu, jumlah energi yang dipancarkan berkaitan secara langsung dengan

suhu benda tersebut. Perbedaan tersebutlah yang memisahkan perpindahan panas melalui radiasi dari konduksi dan konveksi. (koester, 2002).

Sebagian besar energi yang terdapat dalam konstanta surya tidak mencapai langsung permukaan bumi, karena ada penyerapan yang signifikan oleh karbondioksida dan uap air di atmosfer. Radiasi surya yang mencapai permukaan bumi juga dipengaruhi oleh konsentrasi debu dan polutan lainnya di atmosfer. Energi surya maksimum akan mencapai permukaan bumi ketika sinar matahari tersebut langsung mengenai permukaan tanah karena:

- a. Terdapat bidang pandang yang lebih luas terhadap fluks surya yang datang.
- b. Sinar ultraviolet memiliki jarak tempuh yang lebih singkat di atmosfer, sehingga mengalami absorpsi lebih sedikit dari pada sudut timpanya miring terhadap normal (Holman, 1994).

$$c = \lambda v \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana : c = kecepatan cahaya (m/s)
 λ = panjang gelombang (m)
 v = frekuensi (Hz)

Radiasi thermal merupakan suatauproses perpindahan panas yang melibatkan energi dalam bentuk paket-paket yang disebut foton atau kuantum. Menurut postulat Planck, setiap kuantum membawa sebuahenergi tertentu. (Koester, 2002).

$$h = 6,625 \times 10^{-34} \text{ J} \dots \dots \dots (2.5)$$

Setiap kuantum dapat dipandang sebagai entitas partikel yang membawa energi, massa, dan momentum, sebagaimana halnya dengan partikel-partikel gas. Oleh karena itu, pada dasarnya, radiasi dapat

dijelaskan sebagai "gas foton" yang berpindah dari satu lokasi ke lokasi lainnya. Dengan menggunakan keterkaitan relatif antara massa dan energi, kita dapat menurunkan suatu persamaan yang menggambarkan massa dan energi dari partikel tersebut. (Koester, 2002).

$$E = m.c^2 = h.v \dots\dots\dots (2.6)$$

$$m = h.v / c^2 \dots\dots\dots (2.7)$$

$$\text{momentum} = c (hv/c^2) = hv/c \dots\dots\dots (2.8)$$

Dimana : h = konstanta planck

c = kecepatan cahaya

Penyebab yang memengaruhi diterimanya cahaya matahari ke bumi diantaranya adalah (Ardiani, 2005) :

1. Sudut datang sinar ultraviolet, sinar yang datang tegak lurus memberikan energi sinar yang lebih besar dibandingkan dengan yang datangnya condong, karena sinar datang tegak lurus akan menyinari area yang lebih sempit dibandingkan sinar yang condong.
2. Lamanya hari bergantung pada musim dan letak lintang suatu tempat.
3. Kejernihan atmosfer memberikan energi radiasi yang sangat kuat, semakin banyak zat penyerap sinar di atmosfer energi radiasi semakin turun.

Radiasi matahari yang menuju permukaan bumi dikenal sebagai insolation (incoming solar radiation) dan terdiri dari dua jenis, yaitu radiasi secara langsung (direct radiation) dan radiasi tersebar (diffuse radiation). Dari semua jenis radiasi tersebut, hanya Radiasi Aktif Fotosintesis (PAR) yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan. Intensitas radiasi PAR hampir setara dengan radiasi sinar terlihat. Total energi radiasi yang mencapai lapisan atmosfer selama waktu satu tahun dikenal sebagai konstanta surya (solar constant) dan mencapai sekitar 1.360 W/m (Usmadi, 2006).

2.4 Generator

Generator berfungsi sebagai perangkat yang mengubah energi kinetik menjadi energi listrik. Prinsip operasinya didasarkan pada teori medan elektromagnetik. Poros generator menggunakan material ferromagnetik permanen dan dikelilingi oleh stator yang terdiri dari kumparan kawat membentuk loop. Saat poros generator berputar, perubahan fluks magnetik di sekitar stator menyebabkan terjadinya perubahan tegangan dan arus listrik tertentu.

Tegangan atau arus listrik yang dihasilkan dialirkan melalui sistem jaringan kabel listrik. Berdasarkan arus yang dihasilkan, generator dapat dibedakan menjadi dua jenis, yakni generator AC (arus bolak-balik) dan generator DC (arus searah). Generator AC atau alternator menggunakan prinsip induksi elektromagnetik yang serupa dengan generator DC. Arus bolak-balik dapat dihasilkan melalui lilitan kumparan pada medan magnet atau melalui rotasi medan magnet pada lilitan stasioner (stator yang seimbang atau tidak berubah). Besarnya tegangan tergantung pada jumlah lilitan pada kumparan, kekuatan medan magnet, dan kecepatan rotasi lilitan atau medan magnet.. (Zuhail,1998).

2.4.1 Generator Arus Bolak-Balik (AC)

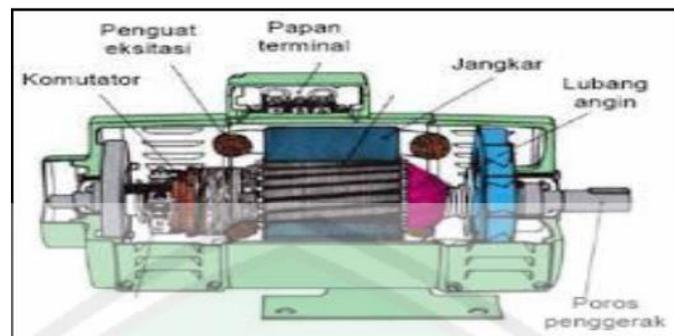
Secara magnetik, generator AC mengubah energi listrik yang dihasilkan dari energi mekanik melalui prinsip induksi elektromagnetik. Proses ini melibatkan pembentukan medan magnet oleh arus yang mengalir melalui konduktor, yang kemudian menghasilkan elektromagnetisme pada konduktor tersebut dengan mengubah medan magnet. Induksi elektromagnetik terjadi ketika konduktor berada dalam medan magnet. Arus bolak-balik adalah arus listrik yang mengalami perubahan periodik dalam besaran dan arahnya, berbeda dengan arus searah yang arahnya tetap konstan seiring waktu. Penggunaan gelombang sinusoidal dipilih karena memungkinkan transfer energi yang paling efisien. Salah satu karakteristik penting dari daya yang dihasilkan

oleh generator AC merupakan nilai faktor daya, yang merupakan rasio antara daya aktif (dalam watt) dengan daya semu atau total (dalam VA), atau kosinus sudut antara daya aktif dan daya semu atau total.. (Zuhal, 1998).

2.4.2 Generator Arus Searah (DC)

Sebagai perangkat mesin listrik yang dinamis, generator arus searah mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator DC, dalam fungsi utamanya, menghasilkan arus searah atau arus DC. Pembagian jenis generator DC didasarkan pada konfigurasi belitan magnet atau metode peningkatan eksitasi pada jungkar, yaitu (Zuhal, 1998) :

1. Generator penguat terpisah
2. Generator *shunt*
3. Generator kompon



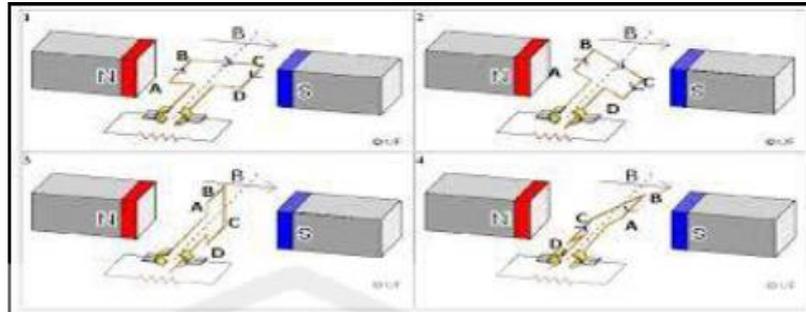
Gambar 2.10 Kontruksi Generator DC (Zuhal, 1998)

Generator DC memiliki dua bagian utama, yakni stator yang tetap dan rotor yang berputar. Stator meliputi kerangka atau struktur motor, kumparan belitan stator, sikat arang, bantalan, dan kotak terminal. Di sisi lain, rotor terdiri dari komutator, kumparan belitan rotor, kipas rotor, dan juga poros rotor.

Syarat untuk dibangkitkan oleh GGL adalah :

1. Adanya konduktor (hantaran kawat)
2. Adanya medan magnetik

3. Adanya gerak atau perputaran dari konduktor dalam medan, atau ada fluksi yang merubah dan memotong konduktor itu.



Gambar 2.11 Prinsip Kerja Generator DC (Zuhal, 1998)

Meskipun tujuannya adalah menghasilkan tegangan searah dari tegangan bolak-balik, pada kumparan jangkar terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan memiliki karakteristik bolak-balik. Bentuk gelombang yang berfluktuasi tersebut perlu disearahkan agar tegangan menjadi searah. Untuk mengubah arus bolak-balik menjadi arus searah, saklar, komutator, dan dioda digunakan. (Zuhal, 1998).

2.5 Persamaan Dalam Mendesain Elemen Mesin

Pada penelitian ini elemen-elemen mesin pada mesin stirling yang dirancang menggunakan referensi dari buku “*Elemen Mesin 1*” dan “*Elemen Mesin 2*”, karya Dhimas Satria. Persamaan-persamaan elemen mesin yang digunakan dalam merancang mesin stirling ini adalah sebagai berikut.

2.5.1 Poros

Poros transmisi (*transmission shaft*) atau sering hanya disebut poros (*shaft*) digunakan untuk mentransmisikan putaran, daya, dan torsi dari satu lokasi ke lokasi yang lain. Komponen mesin yang sering digunakan bersamaan dengan poros adalah roda gigi, *pulley* dan *sprocket*. Transmisi torsi diantara poros dilakukan dengan pasangan roda gigi, sabuk atau rantai. Poros dapat menjadi satu dengan *driver*, seperti poros motor dan *engine crankshaft*. Bisa juga dari poros bebas yang

dihubungkan ke poros lainnya dengan kopling. Bantalan digunakan sebagai dudukan poros.

a. Poros dengan beban torsi murni

1. Poros bulat (pejal)

$$\frac{T}{J} = \frac{\tau}{r} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana : T = torsi (Nm)

J = momen inersia polar (m⁴)

τ = tegangan geser ijin torsional (N/m²)

r = jari-jari poros (m) = d/2

$$J = \frac{\pi}{32} d^4 \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\frac{T}{\frac{\pi}{32} d^4} = \frac{\tau}{\frac{d}{2}} \rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{16 T}{\pi \tau}} \dots\dots\dots(2.11)$$

syarat pemakaian rumus :

- Beban torsi murni
- Poros bulat, pejal, masif
- Beban lain tidak diperhitungkan
- Diameter poros yang dihasilkan merupakan diameter poros minimum, sehingga harus diambil yang lebih besar.

2. Poros berlubang

do : diameter luar

di : diameter dalam

$$J = \frac{\pi}{32} (do^4 - di^4) \dots\dots\dots(2.12)$$

Maka :

$$\frac{T}{\frac{\pi}{32} (do^4 - di^4)} = \frac{\tau}{\frac{do}{2}} \dots\dots\dots(2.13)$$

$$T = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d_o^3 (1 - k^4) \dots\dots\dots(2.14)$$

k adalah faktor diameter (rasio) = $\frac{d_i}{d_o}$

b. Poros dengan beban lenturan murni

1. Poros bulat (pejal)

$$\frac{M}{I} = \frac{\sigma_b}{y} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana : M = momen lentur (Nm)

I = momen inersia (m⁴)

σ_b = tegangan lentur (N/m²)

y = jarak dari sumbu netral ke bagian terluar $y = \frac{d}{2}$

$$I = \frac{\pi}{64} d^4 \dots\dots\dots(2.16)$$

$$\frac{M}{\frac{\pi}{64} d^4} = \frac{\sigma_b}{\frac{d}{2}} \rightarrow M = \frac{\pi}{32} \sigma_b d^3 \dots\dots\dots(2.17)$$

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 M}{\pi \sigma_b}} \dots\dots\dots(2.18)$$

2. Poros berlubang

$$I = \frac{\pi}{64} (d_o^4 - d_i^4) \dots\dots\dots(2.19)$$

$$I = \frac{\pi}{64} d_o^4 (1 - k^4) \dots\dots\dots(2.20)$$

$$\frac{M}{\frac{\pi}{64} d_o^4 (1 - k^4)} = \frac{\sigma_b}{\frac{d}{2}} \dots\dots\dots(2.21)$$

$$M = \frac{\pi}{32} \sigma_b d_o^3 (1 - k^4) \dots\dots\dots(2.22)$$

c. Poros dengan beban kombinasi torsi dan lentur

Teori penting yang digunakan :

1. Teori *Guest* : teori tegangan geser maksimum; digunakan untuk material yang *ductile* (liat), misalnya *mild steel*.

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\sigma_b^2 + 4 \tau^2} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$\sigma_b = \frac{32 M}{\pi d^3} \dots\dots\dots(2.24)$$

$$\tau = \frac{16 \tau}{\pi d^3} \dots\dots\dots(2.25)$$

$$\tau_{max} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{32 M}{\pi d^3}\right)^2 + \left(\frac{16 \tau}{\pi d^3}\right)^2} = \frac{16}{\pi d^3} (\sqrt{M^2 + T^2}) \dots\dots\dots(2.26)$$

Catatan: $\sqrt{M^2 + T^2} = T_e$: torsi ekuivalen

$$T_E = \frac{\pi}{16} \cdot \tau \cdot d^3 \rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{16 T_E}{\pi \tau}} \dots\dots\dots(2.27)$$

2. Teori *Rankine* : teori tegangan normal maksimum; digunakan untuk material yang *brittle* (getas), seperti *cast iron*.

$$\sigma_{b \max} = \frac{1}{2} \sigma_b + \sqrt{\left(\frac{1}{2} \sigma_b\right)^2 + \tau^2} = \frac{32}{\pi d^3} \left[\frac{1}{2} (M + \sqrt{M^2 + T^2}) \right] \dots\dots\dots(2.28)$$

$$\text{Jika : } \frac{1}{2} (M + \sqrt{M^2 + T^2}) = M_e$$

M_e = momen lentur ekuivalen

σ_b = tegangan lentur ijin bahan poros

$$M_e = \frac{\pi}{32} \sigma_b d^3 \rightarrow d = \sqrt[3]{\frac{32 M_e}{\pi \sigma_b}} \dots\dots\dots(2.29)$$

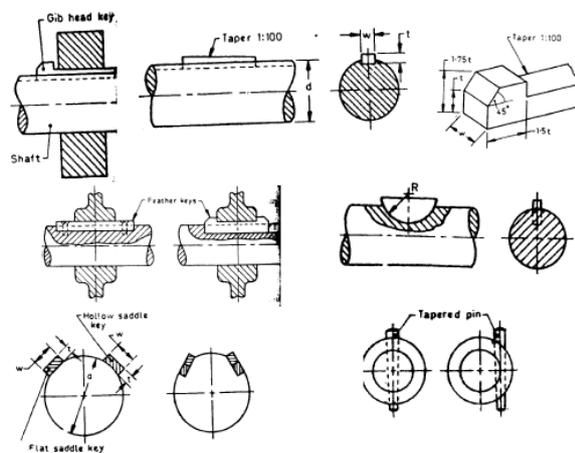
2.5.2 Pasak

Pasak atau *keys* merupakan elemen mesin yang digunakan untuk mengunci antara dua batang poros atau bisa juga digunakan untuk memasang roda gigi dan lain lain pada poros sehingga tidak terjadi slip atau gesekan pada poros.

Pemilihan jenis pasak tergantung pada besar kecilnya daya dan kestabilan komponen yang disambung.

Jenis-jenis pasak yang biasa digunakan:

1. Pasak benam segi empat (*rectangular sunk key*).
2. Pasak bujur sangkar (*square key*).
3. Pasak benam sejajar (*parallel sunk key*).
4. Pasak berkepala (*gib head key*).
5. Dan lain-lain.



Gambar 2.12 Jenis-Jenis Pasak (R.S. Khurmi,2005)

Hal-hal krusial yang harus diperhatikan untuk mendesain sebuah pasak adalah sebagai berikut :

1. Bahan pasak dipilih lebih lemah dari pada bahan poros atau bahan elemen mesin yang harus ditahan oleh pasak.
2. Gaya Tangensial yang bekerja :

$$T = F_t \times \frac{d}{2} \dots\dots\dots(2.30)$$

Dimana :

- T = Torsi (N-mm)
- Ft = Gaya Tangensial (N)
- d = Diameter Poros (mm)

3. Tegangan Geser yang timbul :

$$\tau = \frac{F_s}{A_s} \dots\dots\dots(2.31)$$

Dimana :

Fs = Gaya Geser (N)

As = Luas Bidang Geser yang Tergantung pada Jenis Pasak.

Misalnya Untuk : Pasak benam segi empat berikut :

b = Lebar (mm)

L = Panjang (mm)

As = b x L

Maka, $\tau = \frac{F_s}{A_s} = \frac{F_s}{b \times L} \dots\dots\dots(2.32)$

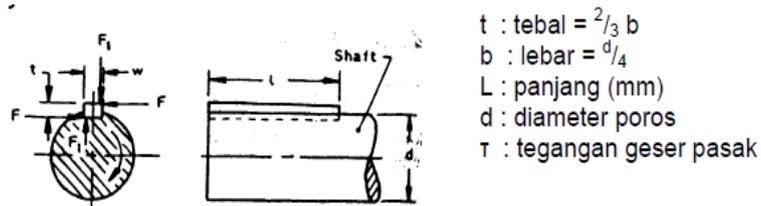
4. Jika Tegangan Geser bahan Pasak (τ) dan Angka Keamanan (SF),

Maka :

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{SF} \dots\dots\dots(2.33)$$

5. Untuk Keamanan : $\tau_{act} < \bar{\tau}$

a. Panjang Pasak



Gambar 2.13 Dimensi Pasak (R.S. Khurmi,2005)

1. Gaya Tangensial (F_t) = Gaya Geser (F_s)

$$F_t = L \times b \times \tau \dots\dots\dots(2.34)$$

Torsi yang di Transmisikan oleh Poros :

$$T = F_t \times \frac{d}{2} = L \times b \times \tau \times \frac{d}{2} \dots\dots\dots(2.35)$$

2. Gaya Tangensial akibat *Crushing* (Terjadi Kerusakan)

$\sigma_c = \text{Tegangan Crushing.}$

$$F_t = L \times \frac{t}{2} \times \sigma_c$$

$$T = F_t \times \frac{d}{2} = L \times \frac{t}{2} \times \sigma_c \times \frac{d}{2} \dots\dots\dots(2.36)$$

3. Torsi akibat Gaya Geser = Torsi akibat *Crushing*.

$$T = L \times b \times \tau \times \frac{d}{2} = L \times \frac{t}{2} \times \sigma_c \times \frac{d}{2} \dots\dots\dots(2.37)$$

$$\frac{b}{t} = \frac{\sigma_c}{2 \times \tau} \dots\dots\dots(2.38)$$

4. Torsi versus Tegangan Geser pada Pasak :

$$T = L \times b \times \tau_k \times \frac{d}{2} \dots\dots\dots(2.39)$$

Keterangan :

$\tau_k = \text{Tegangan Geser bahan Pasak}$

5. Torsi versus Torsional Shear Strength pada pasak.

$$T = \frac{\pi}{16} \times \tau \times d^3 \dots\dots\dots(2.40)$$

Keterangan :

$\tau_s = \text{Tegangan Geser Bahan Poros}$

- a. Panjang Pasak , $L = 1,571 d \cdot \frac{\tau_s}{\tau_k}$

Keterangan : $\tau_s = \text{Bahan Poros}$

$$\tau_k = \text{Bahan Pasak}$$

Jika bahan pasak sama bahan poros atau $\tau_s = \tau_k = \tau$

$$\text{Maka, } L = \frac{\pi \cdot d^2}{8 \cdot b} = 1,571 d \quad (\text{untuk } b : \text{lebar} = d/4)$$

- b. Apabila hasil perhitungan lebar pasak terlalu kecil dan tidak ada tabel pasak yang tersedia, maka lebar pasak dihitung menggunakan rumus: $b = d/4$ mm, dengan d merupakan diameter poros dalam (mm). Dalam desain pasak, panjang pasak harus ditentukan berdasarkan tegangan geser (Shearing Stress) dan tegangan hancur (Crushing Stress) yang terjadi, kemudian diambil nilai panjang terbesar dari keduanya.

Tabel 2.2 Tabel Pasak Standar (R.S. Khurmi,2005)

<i>Shaft diameter (mm) up to and including</i>	<i>Key Cross-Section</i>		<i>Shaft diameter (mm) up to and including</i>	<i>Key Cross-Section</i>	
	Width (mm)	Thickness (mm)		Width (mm)	Thickness (mm)
6	2	2	85	25	14
8	3	3	95	28	16
10	4	4	110	32	18
12	5	5	130	36	20
17	6	6	150	40	22
22	8	7	170	45	25
30	10	8	200	50	28
38	12	8	230	56	32
44	14	9	260	63	32
50	16	10	290	70	36
58	18	11	330	80	40
65	20	12	380	90	45
75	22	14	440	100	50

2.5.3 Belt dan Pulley

Sabuk (belt) digunakan untuk mengirimkan daya dari satu poros ke poros lainnya dengan menggunakan puli atau roda sabuk yang berputar pada poros dengan kecepatan yang sama atau berbeda.

Besarnya daya yang disalurkan atau ditransmisikan tergantung pada faktor berikut:

1. Kecepatan dari *belt*
2. Tarikan *belt* yang berada pada *pulley*
3. Luas kontak *belt* dan *pulley* terkecil
4. Kualitas *belt* yang digunakan.

enis-jenis belt umumnya diklasifikasikan ke dalam tiga kelompok berikut:

1. Sabuk penggerak ringan (*light drives*): Digunakan untuk mentransmisikan daya yang lebih kecil pada kecepatan sabuk sampai 10 m/s, seperti yang digunakan pada mesin-mesin pertanian dan perkakas kecil.
2. Sabuk penggerak sedang (*medium drives*): Digunakan untuk mentransmisikan daya berukuran sedang pada kecepatan sabuk antara 10 m/s hingga 22 m/s, seperti yang ditemukan pada mesin perkakas.
3. Sabuk penggerak berat (*heavy drives*): Digunakan untuk mentransmisikan daya yang besar pada kecepatan sabuk di atas 22 m/s, seperti yang digunakan pada mesin kompresor dan generator.

Ada tiga jenis *belt* bila ditinjau dari segi bentuknya, yaitu :

1. *Flat belt* (sabuk belt datar), digunakan dengan daya yang disalurkan atau ditransmisikan berukuran sedang dari *pulley* satu ke *pulley* yang lainnya ketika jarak dua *pulley* adalah tidak lebih dari 8 meter.
2. *V-belt* (sabuk atau *belt* bentuk V), digunakan dengan daya yang disalurkan atau ditransmisikan berukuran besar dari *pulley* satu ke *pulley* yang lainnya, ketika jarak dua *pulley* adalah sangat dekat.
3. *Circular belt* atau *rope* (sabuk atau *belt* bulat/tali), digunakan dengan daya yang disalurkan atau ditransmisikan berukuran besar dari *pulley* satu ke *pulley* yang lainnya, ketika jarak dua *pulley* adalah melebihi dari 8 meter.

V-belt memiliki beberapa keuntungan dibandingkan *belt* yang lain, yaitu sebagai berikut :

1. Penggerak *V-belt* lebih kokoh akibat jarak yang pendek diantara pusat *pulley*.
2. Gerakan adalah pasti, karena slip antara *belt* dan alur *pulley* sangat kecil sehingga bisa diabaikan.
3. Karena sabuk *V-belt* dibuat tanpa menggunakan ujung dan tidak ada gangguan sambungan, oleh karena itu pergerakan menjadi halus.
4. Memiliki *lifetime* yang lebih lama, yaitu 3 sampai 5 tahun.
5. Lebih mudah untuk dipasang dan dibongkar.
6. Sabuk atau *Belt* memiliki kemampuan untuk melindungi beban *shock* atau kejutan ketika mesin di-*start*.
7. Memiliki rasio kecepatan yang tinggi (maksimum 10).
8. Aksi desak *belt* dalam alur memberikan nilai rasio tarikan yang tinggi. Oleh karena itu, daya yang ditransmisikan oleh *V-belt* lebih besar dari pada *flat belt* untuk koefisien gesek, sudut kontak dan tarikan yang sama dalam *belt*.
9. Sabuk *V-belt* dapat dioperasikan atau digunakan dalam berbagai arah, dengan sisi *tight* belt berada pada bagian atas atau bawah. Posisi garis pusat bisa horizontal, vertikal atau miring.

Selain mempunyai kelebihan seperti yang telah diuraikan diatas, *V-belt* juga mempunyai kekurangan, yaitu sebagai berikut :

1. *V-belt* tidak bisa digunakan untuk jarak pusat panjang, karena berat per unit panjang yang besar.
2. Konstruksi *pulley* untuk *V-belt* lebih rumit dari pada *pulley flat belt*.
3. Karena sabuk *V-belt* mendapat sejumlah *creep* tertentu, oleh karena itu tidak cocok untuk penerapan kecepatan konstan.
4. Umur *belt* sangat dipengaruhi oleh perubahan temperatur, tarikan *belt* yang tidak tepat dan panjang *belt* yang tidak seimbang.
5. Tarikan sentrifugal untuk mencegah penggunaan *V-belt* pada kecepatan di bawah 5 m/s dan di atas 50 m/s.

Koefisien gesek sabuk *belt* dan *pulley* tergantung pada sebuah material *belt*, material *pulley*, slip dari *belt*, dan kecepatan *belt*. Dengan mengikuti persamaan berikut :

$$\mu = 0,54 - \frac{42,6}{152,6+v} \dots\dots\dots(2.41)$$

Dimana : v = kecepatan *belt* (m/menit)

Karena panjang *belt* yang melalui *pulley driver* dalam satu menit sama dengan panjang *belt* yang melalui *pulley driven* dalam satu menit, maka rasio kecepatan adalah :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{d_1}{d_2} \dots\dots\dots(2.42)$$

Pergerakan *belt* dan *pulley* diasumsikan memiliki tegangan dengan gesekan yang kuat antara *belt* dan *pulley*. Namun, dalam beberapa kasus, gesekan menjadi lemah, menyebabkan tergelincir, yang umumnya diungkapkan sebagai persentase. Gugupan tersebut akan mengurangi rasio kecepatan sistem.

- a. Kecepatan *belt* melewati *pulley driver* per detik adalah :

$$v = \frac{\pi d_1 N_1}{60} \left(1 - \frac{s_1}{100}\right) \dots\dots\dots(2.43)$$

b. Kecepatan *belt* melewati *pulley driven* per detik adalah :

$$\frac{\pi d_2 N_2}{60} = v \left(1 - \frac{s_2}{100}\right) \dots\dots\dots(2.44)$$

c. Torsi pada *pulley driven*

$$Torsi = \frac{P \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n^2} \dots\dots\dots(2.45)$$

d. Mencari nilai T1 dan T2

$$(T1 - T2) r2 = Torsi \dots\dots\dots(2.46)$$

$$\sin \alpha = \frac{r1-r2}{x} \dots\dots\dots(2.47)$$

$$\theta = (180 - 2\alpha) \dots\dots\dots(2.48)$$

$$2,3 \log \left[\frac{T1}{T2}\right] = \mu \cdot \theta \cdot \operatorname{cosec} \beta \dots\dots\dots(2.49)$$

e. Tegangan maksimum *belt*

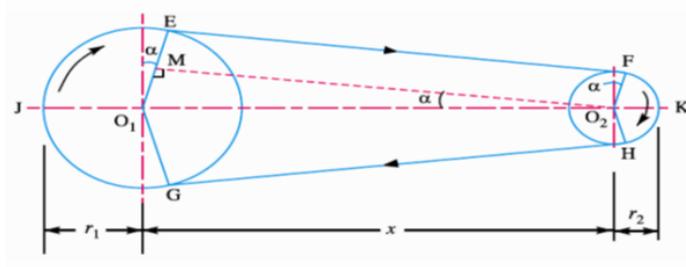
$$\sigma = \frac{T1}{b \cdot t} \dots\dots\dots(2.50)$$

Dimana : b = lebar *belt* (m)

t = tebal *belt* (m)

f. Panjang *belt*

$$L = \pi(r1 + r2) + 2x + \frac{(r1-r2)^2}{x} \dots\dots\dots(2.51)$$



Gambar 2.14 Skematik *Pulley dan Belt*

2.6 Uraian Produk Pesaing

Berdasarkan tinjauan pustaka di atas, produk pesaing digunakan untuk perbandingan dengan produk yang sudah ada, yang nantinya akan dijadikan pembandingan dengan produk yang akan dibuat, berguna untuk melihat kekurangan dan kelebihan dari produk yang akan dibuat. Terdapat 3 produk pesaing, yaitu :

a. Mesin Stirling Karya Anggit Yulianto M (Produk Pesaing 1)

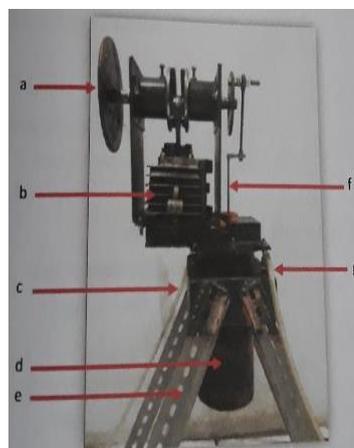
Mesin stirling ini adalah tipe *alpha*, dengan pemanas menggunakan *burner* berbahan bakar *kerosene*. Dan pendinginan menggunakan sirip-sirip pada silinder dinginnya. Metode analisis menggunakan teori *Schmidt*. Mesin ini pada awalnya dirancang menggunakan sumber panas matahari menggunakan *parabolic mirror*, namun temperatur dari pemfokusan sinar matahari tidak sesuai dalam perancangan termodinamika. Sehingga, pemanas diganti menggunakan *burner* dengan bahan bakar LPG dan *kerosene*. Mesin ini memiliki perbedaan temperatur panas dan dingin sebesar 300°C (temperatur panas 350°C dan temperatur dingin 50°C). Dengan menggunakan piston berdiameter 51 mm dan panjang langkah 54 mm. Mesin ini mampu menghasilkan daya 85,49 Watt pada putaran mesin 800 rpm. Saran dari penelitian ini adalah diharapkan pada perancang selanjutnya menganalisa menggunakan teori-teori lain, karena teori *Schmidt* masih banyak pengembangannya. Dan agar lebih diperhatikan dalam merancang komponen regenerator.



Gambar 2.15 Produk Pesaing Pertama (Anggit Yuliantono M, 2010)

b. Mesin Stirling Karya Ahmad Rafe'i (Produk Pesaing 2)

Mesin Stirling ini adalah tipe gamma, dengan pemanas menggunakan kompor gas dan kolektor surya, dengan pendingin menggunakan sirip-sirip. Metode analisis menggunakan teori *Schmidt*. Mesin ini memiliki perbedaan temperatur panas dan dingin sebesar 120°C (temperatur panas 160°C dan temperatur dingin 40°C). Mesin ini mampu menghasilkan putaran maksimum 93,16 rpm, torsi $76,56 \times 10^{-2}$ Nm dan daya 7,46 Watt pada saat pemanasan menggunakan kompor gas, dan mampu menghasilkan putaran maksimum 60,35 rpm dan daya 4,83 Watt saat pemanasan menggunakan kolektor surya.



Gambar 2.16 Produk Pesaing Kedua (Ahmad Rafe'i, 2015)

c. Mesin Stirling Karya Syafriyudin dan Kawan-kawan (Produk Pesaing 3)

Mesin Stirling ini merupakan tipe gamma, dengan pemanasan menggunakan panas matahari. Tetapi tidak terdapat sirip-sirip pada mesin ini, sehingga proses pendinginan kurang efektif dibandingkan produk pesaing 1 dan 2. Mesin ini mampu menghasilkan putaran maksimum 482 rpm pada temperatur 86,9°C untuk kondisi pengujian tanpa pembebanan, dan menghasilkan putaran mesin 238 rpm pada temperatur 162°C untuk kondisi pengujian dengan pembebanan generator. Sehingga, menghasilkan tegangan sebesar 15,7 volt DC.



Gambar 2.17 Produk Pesaing Ketiga (Syafriyudin, 2013)

2.7 Pendekatan Termodinamika Mesin Stirling

Pada perancangan prototype mesin Stirling, langkah pertama melibatkan tahapan perancangan yang mencakup perhitungan termodinamika. Perhitungan ini menjadi dasar untuk merancang elemen-elemen mesin, memilih material, dan menentukan dimensi dari prototype mesin Stirling tersebut.

Salah satu metode yang sering digunakan dalam pemodelan termodinamika mesin Stirling adalah teori Schmidt. Banyak studi yang telah dilakukan untuk mengembangkan teori ini, termasuk penelitian yang dilakukan oleh Urieli, seorang ilmuwan dari Israel. Dalam konteks penelitian ini, digunakan versi teori Schmidt yang diperkenalkan oleh Koichi Hirata, seorang ilmuwan Jepang. Teori Schmidt, juga dikenal sebagai Schmidt Theory, adalah pendekatan perhitungan isothermal untuk mesin Stirling. Metode ini dianggap sebagai salah satu pendekatan yang paling sederhana dan bermanfaat dalam

pengembangan mesin Stirling, karena berfokus pada ekspansi isothermal dan kompresi gas ideal (Hirata, 1995).

2.7.1 Teori *Schmidt*

Kinerja mesin dapat dievaluasi dengan menghitung dari diagram P-V. Volume yang terlibat dalam mesin juga bisa dihitung berdasarkan geometri internalnya. Jika volume dan massa fluida kerja telah ditentukan, maka tekanan dapat dihitung menggunakan prinsip gas ideal seperti yang tertera dalam persamaan di bawah ini.

$$PV = mRT \dots\dots\dots(2.52)$$

Dimana : P = Tekanan (Pa)

V = Volume (m³)

m = Massa gas (Kg)

R = Konstanta Gas Ideal (286,9 J/Kg.K)

T = Suhu/ Temperatur (K)

Parameter-parameter pada sebuah motor stirling dapat dihitung dengan menggunakan asumsi-asumsi sebagai berikut :

- a. Tidak ada *pressure loss* pada *heat exchangers* dan tidak ada perbedaan *internal pressure*.
- b. Pada proses ekspansi dan proses kompresi berlangsung secara *isothermal*.
- c. Kondisi fluida kerja adalah udara sebagai gas ideal.
- d. Terjadi regenerasi sempurna.