

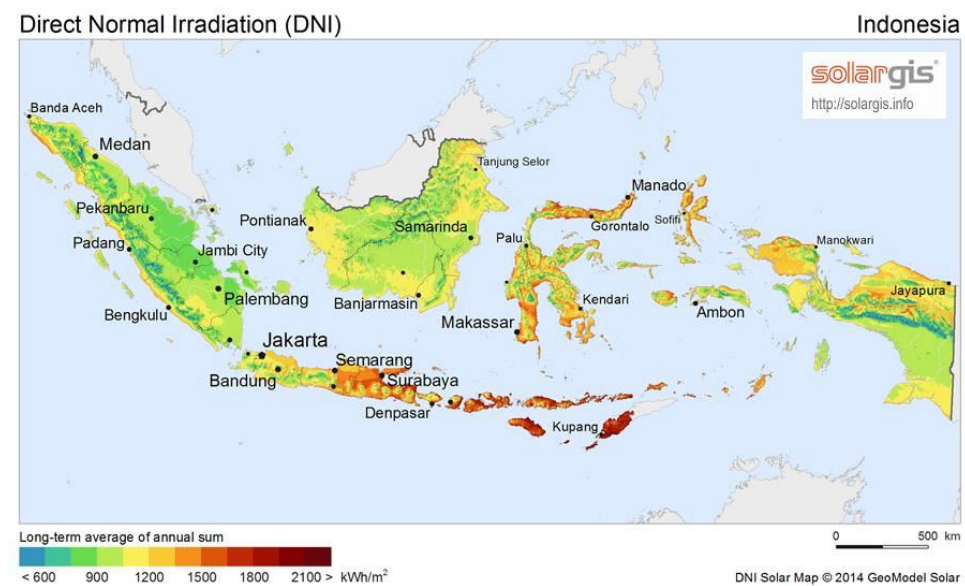
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Distribusi Radiasi Matahari

Intensitas radiasi matahari di luar atmosfer bumi bergantung pada jarak antara matahari dengan bumi. Tiap tahun, jarak ini bervariasi antara $1,47 \times 10^8$ km dan $1,52 \times 10^8$ km dan hasilnya besar pancaran E_0 naik turun antara 1325 W/m^2 sampai 1412 W/m^2 . Nilai rata-ratanya disebut sebagai konstanta matahari dengan nilai $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$.

Pancaran ini tidak dapat mencapai ke permukaan bumi. Atmosfer bumi mengurangi *insolation* yang melewati pemantulan, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen, dan karbon dioksida), serta penyebaran (disebabkan oleh molekul udara, partikel debu atau polusi). Di cuaca yang bagus pada siang hari, pancaran bisa mencapai 1000 W/m^2 di permukaan bumi. *Insolation* terbesar terjadi pada sebagian hari-hari yang berawan dan cerah. Sebagai hasil dari pancaran matahari yang memantul melewati awan, maka *insolation* dapat mencapai hingga 1400 W/m^2 untuk jangka pendek (Darmanto, 2011).



Gambar 1. Direct Normal Irradiation

(Sumber : Solargis.info, 2014)

1.1.1 Radiasi Matahari pada Permukaan Bumi

Ada tiga macam cara radiasi matahari sampai ke permukaan bumi, yaitu:

- Radiasi langsung (*Beam/Direct Radiation*)

Adalah radiasi yang mencapai bumi tanpa perubahan arah atau radiasi yang diterima oleh bumi dalam arah sejajar sinar datang.

- Radiasi hambur (*Diffuse Radiation*)

Adalah radiasi yang mengalami perubahan akibat pemantulan dan penghamburan.

- Radiasi total (*Global Radiation*)

Adalah penjumlahan radiasi langsung (*direct radiation*) dan radiasi hambur (*diffuse radiation*).

Cahaya matahari pada permukaan bumi terdiri dari bagian yang langsung dan bagian yang baur. Radiasi langsung datang dari arah matahari dan memberikan bayangan yang kuat pada benda. Sebaliknya radiasi baur yang tersebar dari atas awan tidak memiliki arah yang jelas tergantung pada keadan awan dan hari tersebut (ketinggian matahari), baik daya pancar maupun perbandingan antara radiasi langsung dan baur.

Energi matahari yang ditransmisikan mempunyai panjang gelombang dengan *range* 0,25 mikrometer sampai 3 mikrometer (untuk di luar atmosfer bumi atau *extraterrestrial*), sedangkan untuk di atmosfer bumi berkisar antara 0,32 mikrometer sampai 2,53 mikrometer. Hanya 7% energi tersebut terdiri dari ultraviolet (AM 0), 47% adalah cahaya tampak (cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0,4 mikrometer sampai 0,75 mikrometer), 46% merupakan cahaya inframerah (Darmanto, 2011).

Beberapa hal dapat mempengaruhi pengurangan intensitas *irradiance* pada atmosfer bumi (Darmanto, 2011). Pengaruh tersebut dapat berupa:

- Pengurangan intensitas karena refleksi (pemantulan) oleh atmosfer bumi

- Pengurangan intensitas oleh karena penyerapan zat-zat di dalam atmosfer (terutama oleh O₃, H₂O, O₂, dan CO₂)
- Pengurangan intensitas oleh karena *Rayleigh scattering*
- Pengurangan intensitas oleh karena *Mie scattering*

Sedangkan radiasi yang jatuh pada permukaan material pada umumnya akan mengalami refleksi, absorpsi, dan transmisi. Dari tiga proses ini maka material akan memiliki reflektivitas (ρ), absorptivitas (α), dan transmisivitas (τ).

Refleksi adalah pemantulan dari sebagian radiasi tergantung pada harga indeks bias dan sudut datang radiasi. Refleksi spektakuler terjadi pantulan sinar pada sebuah cermin datar dimana sudut datang sama dengan sudut pantul. Sedangkan refleksi difusi terjadi berupa pantulan kesegala arah.

Transmisi memberikan nilai besar radiasi yang dapat diteruskan oleh suatu lapisan permukaan. Kemampuan penyerapan (absorptivitas) dari suatu permukaan merupakan hal yang penting dalam pemanfaatan radiasi seperti pada pemanfaatan radiasi surya. Harga absorptivitas berlainan untuk sudut datang radiasi yang berlainan. Menurut *British Building Research* untuk sudut datang dibawah 75°, harga absorptivitas terletak antara 0,8 sampai 0,9 dari absorptivitas yang dimiliki oleh suatu benda

Absorptivitas memberikan nilai besarnya radiasi yang dapat diserap. Misalnya pada bagian *absorber* pada sebuah pengumpul radiasi surya. Ketiga proses tersebut diatas yaitu, absorpsi, refleksi, dan transmisi adalah hal yang penting dalam proses pemanfaatan radiasi surya, karena ini menyangkut efektifitas pemanfaatan pada sebuah pengumpul radiasi surya.

1.1.2 Potensi Energi Surya

Energi surya merupakan energi yang potensial dikembangkan di Indonesia, mengingat Indonesia merupakan negara yang terletak di daerah khatulistiwa. Energi surya yang dapat dibangkitkan untuk seluruh daratan Indonesia yang mempunyai luas 2 juta km² rata-rata sebesar 5,10 mW atau 4,8

kWh/m²/hari. Oleh karena itu energi surya memiliki keunggulan-keunggulan dibandingkan dengan energi fosil, diantaranya:

- Sumber energi yang mudah didapatkan.
- Ramah lingkungan.
- Sesuai untuk berbagai macam kondisi geografis.
- Instalasi, pengoperasian dan perawatan mudah.
- Listrik dari energi surya dapat disimpan dalam baterai, dipakai langsung atau disambungkan ke grid.

Tabel 1. Potensi Energi Surya

Kelas	Iradiasi surya per hari (kWh/m ²)	Kapasitas Pembangkit (kW)
Skala Kecil	3,0 – 4,0	1 - 25
Skala Menengah	4,0 – 6,0	25 - 1000
Skala Besar	>6,0	> 1000

(Sumber : NREL, 2014)

Energi surya berupa radiasi elektromagnetik yang dipancarkan ke bumi berupa cahaya matahari yang terdiri atas foton atau partikel energi surya yang dikonversikan menjadi energi listrik. Energi surya yang sampai pada permukaan bumi disebut sebagai radiasi surya global yang diukur dengan kepadatan daya pada permukaan daerah penerima. Rata-rata nilai dari radiasi surya atmosfer bumi adalah 1.353 W/m yang dinyatakan sebagai konstanta surya (Buku Panduan PNPM Energi Terbarukan, 2011).

Intensitas radiasi surya dipengaruhi oleh waktu siklus perputaran bumi, kondisi cuaca meliputi kualitas dan kuantitas awan, pergantian musim dan posisi garis lintang. Intensitas radiasi sinar matahari di Indonesia berlangsung 4 - 5 jam per hari. Produksi energi surya pada suatu daerah dapat dihitung sebagai berikut:

$$E = I \cdot A$$

dimana,

E = Energi surya yang dihasilkan (W)

I = Irradiasi/Intensitas radiasi surya rata-rata yang diterima selama satu jam (W/m^2)

A = Luas area (m^2)

1.2 Lensa Fresnel

1.2.1 Pengertian Lensa Fresnel

Lensa Fresnel adalah sebuah lensa yang dikembangkan oleh seorang fisikawan berkebangsaan Perancis, Augustin Jean Fresnel untuk aplikasi pada mercusuar. Konstruksi lensa didesain dengan panjang fokus yang pendek, jarak fokus tak terhingga dan tebal lensa yang sangat tipis jika dibandingkan dengan lensa konvensional, agar dapat melewatkan lebih banyak cahaya sehingga lampu mercusuar dapat terlihat dari jarak yang lebih jauh.

Menurut majalah Smithsonian, lensa Fresnel yang pertama digunakan pada tahun 1823 pada mercusuar Cordouan di tanjung muara Gironde, sinar cahaya yang dipancarkan mampu terlihat dari jarak 20 mil (32 km).^[5] Seorang fisikawan Skotlandia, Sir David Brewster, memperkenalkan lensa ini untuk digunakan pada seluruh mercusuar di daratan Inggris.

Sebelum lensa Fresnel ditemukan, ide untuk membuat lensa yang lebih tipis dan ringan yang tersusun dari beberapa bagian terpisah dalam sebuah bingkai, sering disebut sebagai ide dari Georges Louis Leclerc dan Comte de Buffon. Fresnel menyempurnakan penyusunan lensa-lensa konsentrik tersebut berdasarkan perhitungan zona Fresnel.

Lensa Fresnel terbagi menjadi 6 kategori berdasarkan panjang fokusnya. Kategori yang pertama merupakan lensa yang terbesar dengan panjang fokus 920 mm (36 inci). Kategori yang terakhir dengan lensa terkecil mempunyai panjang fokus 150 mm (5,9 inci). Pengembangan lensa Fresnel lebih lanjut menambahkan dua kategori lensa yang baru yaitu lensa Fresnel mesoradial dan

hyper radial. Pemanfaatan energi termal surya dengan konsentrator lensa fresnel untuk aplikasi *stirling engine*.

1.2.2 Prinsip kerja kolektor konsentrasi

Beberapa aplikasi termal dibutuhkan energi dalam bentuk temperatur tinggi. Intensitas radiasi surya yang ditransfer menjadi panas dapat dinaikkan dengan cara mengurangi area dimana kerugian radiasi dan panas terjadi. Hal ini dapat dilakukan dengan cara menempatkan perangkat optik antara sumber radiasi dengan permukaan penyerap (*absorber*) energi.

Menurut Kalogirou (2004), pada *concentrating collector* energi surya dikonsentrasikan/difokuskan secara optikal sebelum ditransfer menjadi panas. Mekanisme konsentrasi ini dapat diperoleh dengan cara pemantulan (*reflection*) atau pembiasan (*refraction*) radiasi surya dengan menggunakan cermin atau lensa. Cahaya yang dipantulkan atau dibiaskan akan terkonsentrasi pada daerah fokus, selanjutnya akan menaikkan flux energi pada target penerima (*receiver/absorber*).

Untuk menghitung jumlah radiasi matahari yang masuk melalui konsentrator harus diketahui luasan bukaan/penangkapan (*aperture area*) dari konsentrator tersebut. Radiasi surya pada area ini dapat diperoleh dengan pengukuran langsung dan tidak termasuk pengurangan beberapa area akibat pengaruh sudut datang matahari atau efek bayangan. Intensitas radiasi matahari (*insolation*) yang melalui luasan konsentrator akan difokuskan dan diserap seperti pada kasus *flat-plate collector*.

Menurut Stine & Geyer (2001), laju energi surya pada bukaan (*aperture*) kolektor, disebut *aperture irradiance*. Dimana *aperture irradiance* tersebut terdiri dari *beam/ direct/normal* dan *diffuse aperture irradiance*. Sudut datang matahari antara *aperture normal* dan pusat dari sinar matahari tergantung dari waktu dalam hari, hari dalam tahun, lokasi dan orientasi *aperture* dan tergantung tipe serta akurasi alat penjejak surya (*solar tracker*).

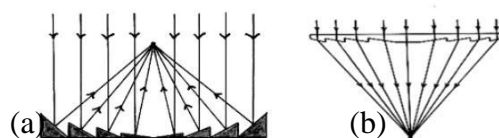
Untuk kolektor surya tipe konsentrasi, intensitas radiasi surya yang diperhitungkan adalah *direct/beam/normal irradiance* dimana dapat diperoleh dengan pengukuran langsung dengan alat

1.2.3 Sejarah singkat lensa fresnel

Georges Louis Leclerc (1748) menciptakan lensa yang lebih tipis dan lebih ringan dengan membuat bagian lensa terpisah yang dipasang dalam suatu bingkai. Selanjutnya Marquis de Condorcet (1743-1794) membuat lensa bergerigi dari sepotong kaca tipis tunggal. Namun demikian, istilah lensa fresnel diambil dari nama seorang matematikawan dan fisikawan Perancis Augustin-Jean Fresnel (1822), dengan mengembangkan lensa yang dipakai untuk lensa pembakar dan digunakan untuk mercusuar (Madhugiri & Karale,2012). Perjalanan sejarah penggunaan lensa fresnel hampir selama dua abad lebih. Pada awalnya lensa fresnel hanya digunakan untuk lampu penerangan namun sekarang sudah banyak diaplikasikan dalam teknologi energi surya. Demikian juga bahan fresnel yang awalnya dari kaca/*glass* sekarang sudah dikembangkan dari bahan-bahan yang lain, terutama plastik. Pertama kali penggunaan lensa fresnel dari bahan plastik *polymethyl-methacrylate* (PMMA) dimulai pada tahun 1950-an (Leutz & Suzuki, 2001).

1.2.4 Tipe lensa fresnel

Menurut Menghani, *et.al* (2012), ada dua tipe fresnel yaitu lensa bias (*refractive lens*) dan cermin pantul (*reflective mirrors*). Lensa fresnel bias sebagian besar digunakan dalam aplikasi fotovoltaik sedangkan cermin reflektif banyak diaplikasikan dalam *solar thermal power*. Disain optikal lensa fresnel lebih fleksibel dan menghasilkan kerapatan fluks yang seragam pada *absorber*. Gbr 2. menunjukkan gambar skematik dari tipe fresnel



Gambar 2.(a) *Reflective Mirror Fresnel*, (b) *Refractive Lens Fresnel*

(Sumber: Menghani, *et al*, 2012)

Fresnel juga diklasifikasi menjadi *imaging lens* (3D-lens) dan *non-imaging lens* (2D-lens). Perbedaan dari kedua tipe ini adalah bentuk bidang fokusnya.

Lensa *imaging* berupa fokus titik (*focalpoint*) sedangkan tipe *non-imaging* berupa garis (*line/linear focus*) di sepanjang sumbu dari *reflektor cylindrical parabolic*.

1.3 Mesin Stirling (Heat Engine)

Mesin stirling beroperasi melalui pembakaran eksternal dan heat sink eksternal, masing-masing dijaga agar memiliki perbedaan temperatur yang cukup besar. Proses peredaran termodinamika dikenal dua jenis proses yaitu :

Proses *Irreversible* adalah proses termodinamik yang berlangsung secara alami seluruhnya. Proses tersebut berlangsung secara spontan dalam satu arah tapi tidak pada arah sebaliknya. Contoh kalor berpindah dari benda bersuhu tinggi ke benda bersuhu rendah. (Fraser, 2008).

Proses *Reversible* adalah proses termodinamik yang dapat berlangsung secara bolak-balik. Sebuah sistem yang mengalami idealisasi, proses *reversible* selalu mendekati keadaan kesetimbangan termodinamika antara sistem itu sendiri dengan lingkungannya. Proses *reversible* merupakan proses seperti keseimbangan. (Cronenberg, 2005)

Mesin Stirling merupakan sebuah mesin dengan sistem pembakaran eksternal yang prinsip kerjanya berdasarkan prinsip peredaran termodinamika. Materi tentang Pembangkit tenaga surya berbasis mesin stirling ini belum banyak yang membahas dan belum benar-benar diterapkan di Indonesia.

Syafriyudin (2013) dengan judul penelitian Pembangkit Listrik Tenaga Surya berbasis Mesin Stirling Skala Rumah Tangga. Dalam penelitian ini menjelaskan pembangkit listrik solar dish stirling mampu memanfaatkan energi panas matahari untuk menunjang pasokan listrik satu rumah tangga 450VA. Syarifudin mendesain solar dish stirling berbasis rumah tangga menggunakan gamma stirling, gamma stirling mempunyai kinerja yang lebih baik dibandingkan alfa dan beta. Syarifudin mengevaluasi kinerja mesin terhadap daya listrik keluaran untuk mencukupi kebutuhan satu rumah tangga.

Fraser (2008) dengan tesis berjudul *Stirling Dish System Performance Prediction Model*. Dalam tesis ini Pasokan energi listrik pembangkit listrik berbasis mesin stirling akan berbeda sesuai kondisi wilayahnya dan hal itu

dipengaruhi oleh kecepatan angin, intensitas radiasi matahari dan ketinggian pembangkit tersebut. Fraser meneliti tentang pengaruh *Intercept Factor* terhadap kinerja sistem yang lain.

Karabulut H (2009) dengan judul penelitian *Construction and Testing of adish/Stirling solar energy unit*. Dalam penelitian ini menjelaskan pembuatan dan percobaan *stirling dish* untuk menambah pasokan listrik ke dalam grid atau off grid. Karabulut H merekonstruksi desain Solar Dish Stirling sesederhana mungkin agar tidak memakan biaya dan tempat. Mesin yang digunakan ialah Mesin Gamma Stirling dan mengevaluasi kecepatan mesin untuk menghasilkan berapa banyak daya listrik yang dihasilkan.

1.3.1 Sejarah Perkembangan 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.

Prinsip kerja secara teoretis dikembangkan George Cayley dari Inggris 20 tahun lebih awal. Istilah mesin *stirling* dipopulerkan kali pertama kali oleh Rolf Meijer untuk menjelaskan semua tipe mesin gas regeneratif siklus tertutup.

Perkembangan produksi mesin *stirling* dibawa J Ericsson, penemu dan insinyur berkewarganegaraan Swedia. Dia berhasil dalam fabrikasi mesin *stirling* dan menjual hingga 2.000 unit mesin ukuran 0.5-5 hp sekitar tahun 1850 di Inggris dan Amerika.

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 sembilanbelas sampai sekitar tahun 1920, yaitu ketika mesin pembakaran internal dan motor listrik mulai menggantikannya.

Mesin dengan udara panas (*hot-air machine*) dikenal karena cara kerjanya yang mudah, kemampuannya menggunakan berbagai jenis bahan bakar; selain itu operasinya aman, tidak berisik, efisiensinya memadai (*moderate*) , stabil dan rendah biaya perawatannya. Kekurangannya adalah ukurannya yang sangat besar

namun daya keluarannya (output) kecil dan harganya investasinya tinggi / mahal (untuk ukuran saat itu).

Lepas dari pada itu, karena biaya operasinya rendah, maka mesin Stirling dipilih aplikasinya untuk mesin dengan tenaga uap – pilihan satu-satunya pada saat itu- yang boros bahan bakar untuk mesin dengan daya yang sama, dan memerlukan perhatian khusus untuk mencegah terjadinya bahaya ledakan atau kerusakan lainnya.

Kekurangan utama lainnya untuk jenis mesin udara panas adalah kecenderungannya gagal operasi apabila *heater head* terlalu panas, walaupun hal itu kemudian dapat diatasi setelah dilakukan rekayasa ulang *heater head* nya, yang dapat mencegah panas lebih, serta aman pada mesin dengan daya rendah .

Namun tetap saja penyempurnaan ini tidak mampu meningkatkan daya saing mesin ini terhadap mesin-mesin pembakaran internal lainnya yang bermunculan dipasaran pada waktu itu yang harganya jauh lebih murah.

Setelah itu, mesin stirling dibuat dengan output dan efisiensi lebih tinggi. Mesin stirling mendapat perhatian kembali tahun 1940-an setelah Philips Co mulai mengembangkan mesin stirling sebagai pembangkit listrik portabel. Mesin itu juga diteliti sebagai refrigerator dan sukses mendinginkan sampai suhu 74 K.

Penemuan baru baja tahan karat (*stainless steel*) dan berkembangnya pengetahuan pada proses mesin termodinamik yang kompleks, mengawali temuan mesin-mesin baru, menjelang dan sesudah perang Dunia ke II. Desain mesin udara panas yang disempurnakan , dengan bobot dan harga yang lebih murah, konstruksi dan operasinya yang mudah, dan yang lebih penting lagi adalah variasi bahan bakarnya yang tetap tidak berubah (bisa dengan udara ataupun gas). Ironisnya, beberapa negara maju justru tidak tertarik menggunakan sistem mesin yang “sangat sederhana” ini untuk umpamanya pada mesin otomotif yang canggih, sistem pembangkit daya (listrik,dll, bukan untuk daya dorong primer) pada pesawat ruang angkasa dll.

Situasi ini kemudian berubah tahun 1980, setelah *USAID* (Agen AS untuk bantuan pengembangan internasional) mendanai pengembangan pembuatan mesin Stirling untuk negara-negara berkembang , dan itu dimulai dari Bangladesh. Dari

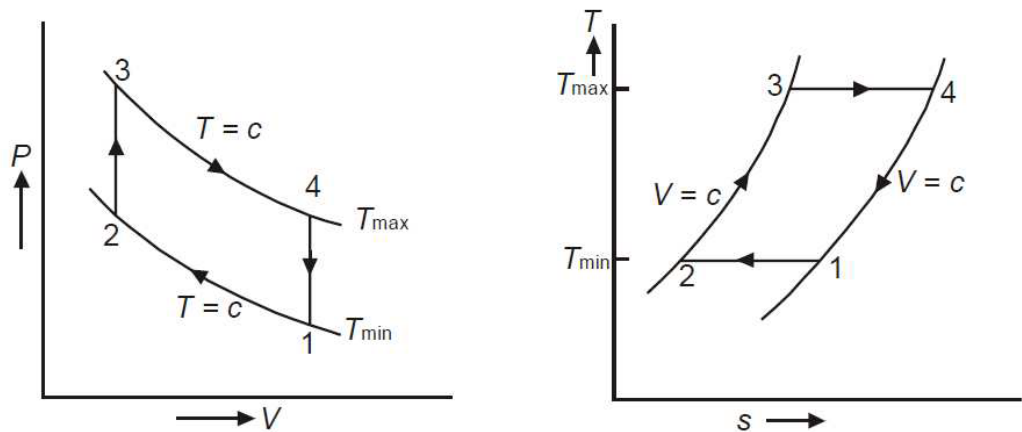
sinilah berawal prospek pengembangan dan pemanfaatan mesin Stirling untuk negara-negara berkembang lainnya , di Afrika, Asia dan Amerika Latin, sebagai salah satu solusi mesin yang murah dan hemat energi dengan menggunakan udara atau gas (helium, hydrogen, nitrogen, methanol dsb) sebagai fluida kerjanya.

Mesin Stirling generasi baru ini jauh lebih kuat, lebih efisien, tidak berisik, mudah penggunaannya, dan memiliki daya tahan yang lebih tinggi, serta mudah diproduksi secara massal. Digunakan antara lain untuk mesin pembangkit listrik, mesin pendingin, mesin pompa dll.

Setelah itu mesin stirling diteliti secara luas di seluruh dunia. Kebijakan penghematan energi pun meningkatkan pengembangannya. Beberapa mesin dengan efisiensi tinggi dikembangkan. Saat ini, mesin stirling dengan berbagai sumber energi dikembangkan para peneliti di dunia. Pada masa datang, kita bisa melihat mesin stirling yang berkebisingan rendah, tahan lama, andal, operasi multibahan bakar, gas buang bersih, dan lain-lain. Beberapa perusahaan juga mendesain mesin stirling dengan helium sebagai gas kerja (konduktivitas lebih baik daripada udara).

1.3.2 Prinsip Kerja

Prinsip Kerja Mesin stirling adalah mesin kalor yang unik karena efisiensi teoretisnya mendekati efisiensi teoretis maksimum, yang lebih dikenal dengan efisiensi mesin carnot. Mesin stirling digerakkan ekspansi gas ketika dipanaskan dan diikuti kompresi gas ketika didinginkan. Mesin itu berisi sejumlah gas yang dipindahkan antara sisi dingin dan panas terus-menerus. Piston displacer memindahkan gas antara dua sisi dan piston power mengubah volume internal karena ekspansi dan kontraksi gas.



Gambar 3. Grafik PV dan TS siklus Mesin Stirling

(sumber: Vineeth C. S., *Stirling Engines: A Beginner Guide*)

Siklus mesin stirling diatas terdiri atas empat tahap termodinamika, antara lain:

1. Titik 1 – 2, Isotermal Kompresi

Fluida kerja dikompresi secara isotermal di dalam piston dari V_{\max} ke V_{\min} . Bersamaan dengan kalor dibuang oleh udara ke lingkungan dan terjadilah kerja yang dibutuhkan mesin stirling untuk mengkompresi fluida.

2. Titik 2 – 3, Pemanasan Isokhorik

Fluida kerja dipanaskan pada volume konstan ke temperatur T_{\max} dengan melewati fluida kerja menuju *hot side piston* dalam arah yang berlawanan dengan proses 4-1. Pada proses ini kalor diserap oleh fluida kerja dari sumber panas. Merupakan proses dimana kalor masuk ke dalam mesin stirling.

3. Titik 3 – 4, Isotermal Ekspansi

Fluida kerja berekspansi secara isotermal, pada temperatur konstan (T_{\max}) dari v_{\min} menuju v_{\max} . Kalor yang masuk harus melebihi kebutuhan energi untuk proses ekspansi sehingga proses 3 – 4 perlu diperhitungkan untuk memprediksi berapa banyak kalor yang harus diberikan sumber eksternal kepada mesin stirling selama operasi / proses terjadi.

4. Titik 4 – 1, Pendinginan Isokhorik

Fluida kerja bergerak menuju *cold side piston* dan didinginkan pada volume konstan ke temperatur T_{\min} . Pada proses ini kalor dibuang ke lingkungan. Semakin banyak kalor yang dibuang tentu saja akan mempermudah proses 1 – 2, sehingga stirling dapat dengan melakukan proses lebih mudah / ringan.

Kerja siklus mesin stirling dapat dihitung dengan

$$W_{net} = W_{exp} + W_{comp} \quad (\text{Tlili dan Musmar, 2013})$$

Dimana,

W_{net} = Merupakan kerja yang dihasilkan oleh mesin stirling pada 1 siklus (joule)

W_{exp} = Merupakan kerja yang dihasilkan oleh mesin stirling untuk melakukan proses ekspansi pada 1 siklus (joule)

W_{comp} = Merupakan kerja yang dihasilkan oleh mesin stirling untuk melakukan proses kompresi pada 1 siklus (joule)

Kerja ekspansi pada mesin stirling dapat dihitung menggunakan rumus

$$W_{exp} = n \cdot R \cdot T_H \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (\text{Urieli, 2013})$$

Dimana,

n = Mol fluida kerja (Kmol)

R = Konstanta gas ideal (Kj/kmolK)

T_H = Temperatur Hot Side (K)

V_{max} = Volume maksimum fluida kerja (cm^3)

V_{min} = Volume minimum fluida kerja (cm^3)

Kerja kompresi pada mesin stirling dapat dihitung menggunakan rumus

$$W_{comp} = n \cdot R \cdot T_C \ln \left(\frac{V_{min}}{V_{max}} \right) \quad (\text{Urieli, 2013})$$

Dimana,

- n = Mol fluida kerja (Kmol)
 R = Konstanta gas ideal (Kj/kmolK)
 T_c = Temperatur Cold Side (K)
 V_{max} = Volume maksimum fluida kerja (cm^3)
 V_{min} = Volume minimum fluida kerja (cm^3)

Untuk menentukan jumlah panas yang dibutuhkan selama 1 siklus mesin stirling digunakanlah rumus

$$Q_{total} = Q_{heat} + Q_{exp} \quad (\text{Martini, 1983})$$

Dimana,

- Q_{total} = Merupakan jumlah panas yang harus disuplai pada mesin stirling untuk menjalankan 1 siklus (joule)
 Q_{heat} = Merupakan jumlah panas yang harus disuplai pada mesin stirling untuk melakukan proses pemanasan isokhorik pada 1 siklus (joule)
 Q_{exp} = Merupakan jumlah panas yang harus disuplai pada mesin stirling untuk melakukan proses ekspansi pada 1 siklus (joule)

Untuk menghitung jumlah panas pada proses pemanasan isokhorik (volume konstan) pada mesin stirling dapat menggunakan rumus

$$Q_{heat} = m \cdot C_v \cdot (T_{max} - T_{min}) \quad (\text{Martini, 1983})$$

Dimana,

- m = Massa fluida kerja (Kg)
 C_v = Kapasitas panas pada volume konstan (Kj/kmolK)
 T_{min} = Temperatur Hot Side (K)
 T_{max} = Temperatur Cold Side (K)

Untuk menghitung jumlah panas pada proses ekspansi pada mesin stirling dapat dihitung menggunakan rumus

$$Q_{exp} = n \cdot R \cdot T_H \ln \left(\frac{V_{max}}{V_{min}} \right) \quad (\text{Martini, 1983})$$

Dimana,

- n = Mol fluida kerja (Kmol)
- R = Konstanta gas ideal (Kj/kmolK)
- T_H = Temperatur Hot Side (K)
- V_{max} = Volume maksimum fluida kerja (cm³)
- V_{min} = Volume minimum fluida kerja (cm³)

Dikarenakan rumus yang digunakan untuk mencari Q_{exp} dan W_{exp} maka dapat disimpulkan bahwa

$$Q_{exp} = W_{exp} \quad (\text{Martini, 1983})$$

Untuk menghitung jumlah fluida kerja yang terdapat dalam mesin Stirling digunakanlah persamaan Gay – Lussac

$$PV = nRT \quad (\text{Moran, 2004})$$

$$n = \frac{RT}{PV} \quad (\text{Moran, 2004})$$

Dimana,

- n = Mol fluida kerja (Kmol)
- R = Konstanta gas ideal (bar cm³/kmol K)
- T = Temperatur (K)
- V = Volume fluida kerja (cm³)
- P = Tekanan fluida kerja (bar)

2.3.3 Jenis - Jenis Mesin Stirling

Mesin Stirling memiliki dua jenis yang dibedakan oleh cara mereka memindahkan udara antara sisi panas dan dingin dari silinder:

1. Dua piston “alpha” desain jenis memiliki piston dalam silinder terpisah, dan gas didorong antara ruang panas dan dingin.
2. Jenis mesin Stirling yang dikenal sebagai tipe “beta dan gamma”, menggunakan displacer (pemindah panas) mekanis yang telah terisolasi untuk mendorong gas kerja antara sisi panas dan dingin dari silinder. Displacer, cukup besar untuk mengisolasi sisi panas dan dingin dari silinder untuk menggantikan sejumlah besar gas. Jenis Ini harus memiliki jarak yang cukup antara displacer dan dinding silinder, untuk memungkinkan gas mengalir di sekitar displacer dengan mudah.

2.3.4 Kelebihan dan Kekurangan Mesin Stirling

Ada beberapa kelebihan dan kekurangan digunakannya mesin stirling pada pembangkit ini. (Urieli dan Berchowitz, 1984)

Kelebihan :

1. Potensi Maksimal efisiensinya karena hampir mendekati efisiensi mesin carnot.
2. Fleksibilitas bahan bakar yang digunakan, bisa biomass, panas matahari, geothermal dan bahan bakar fosil.
3. Rendahnya oksidasi Nitrogen dibandingkan mesin pembakaran lainnya (Rendahnya Emisi atau pencemaran udara)
4. Tidak berisik dan tidak banyak getaran sewaktu bekerja
5. Pistonnya memiliki kehandalan tinggi
6. Stirling engine bisa menggunakan dua proses sistem termodinamika
7. Tingginya usaha kerja yang dihasilkan

Kekurangan :

1. Responnya lambat ketika ada penambahan dan pengurangan beban
2. Rendahnya daya listrik keluarannya

2.3.5 Heat sink

Heat sink adalah perangkat logam konduktif termal yang dirancang untuk menyerap dan membubarkan panas dari benda suhu tinggi seperti prosesor komputer. Heat sink yang terbuat dari logam, seperti paduan tembaga atau aluminium, dan melekat pada prosesor. Kebanyakan heat sink memiliki sirip, iris tipis logam terhubung ke dasar heat sink, yang membantu menyebarkan panas di wilayah yang luas.

Kombinasi dari heatsink dan fan (HSF) disebut sebagai heat sink aktif, sedangkan heat sink tanpa kipas adalah heat sink pasif. Selain HSF, senyawa heat sink kadang-kadang digunakan. Ini adalah lapisan antara perangkat dan heat sink untuk meningkatkan konduksi termal. Heat sink yang umum digunakan pada CPU dan juga digunakan dalam pendingin dan sistem pendingin udara, GPU dan prosesor kartu video. Fans digunakan untuk mensuplai udara dingin dan mendorong udara panas dari heatsink, membantu mendinginkan heat sink itu sendiri dan mengoptimalkan kerja heat sink.

Panas dapat ditransfer dalam tiga cara yang berbeda: konveksi, radiasi dan konduksi. Konduksi adalah cara panas dipindahkan dalam solid, dan karena itu adalah cara yang ditransfer dalam heat sink. Konduksi terjadi ketika dua benda dengan suhu yang berbeda datang ke dalam kontak dengan satu sama lain.

Pada titik di mana dua benda bertemu, semakin cepat bergerak molekul dari objek kecelakaan hangat ke dalam molekul bergerak lambat dari objek dingin. Ketika ini terjadi, molekul bergerak lebih cepat dari objek yang lebih hangat memberikan energi untuk molekul bergerak lebih lambat, yang pada gilirannya memanaskan objek dingin. Proses ini dikenal sebagai konduktivitas termal, yang adalah bagaimana heat sink mentransfer panas dari komponen yang didinginkan.

Heat sink diklasifikasikan ke dalam kategori yang berbeda berdasarkan kriteria yang berbeda. Tipe-tipe heat sink:

- Heat Sinks Aktif

Ini merupakan tipe kipas (fan) umum dan memanfaatkan daya untuk tujuan mendinginkan. Heat sink aktif juga dapat disebut sebagai Heat sink atau kipas (fans). Fans diklasifikasikan lebih lanjut sebagai jenis bantalan bola dan jenis lengan bantalan. Mesin fans berlambang bola lebih disukai karena rentang kerjanya lebih panjang dan lebih murah, tetapi tidak untuk aplikasi jangka panjang karena mereka terdiri dari bagian yang bergerak dan agak mahal juga.

- Heat Sinks Pasif

Ini tidak memiliki komponen mekanik dan terbuat dari aluminium bersirip radiator. Ini menghilangkan energi termal atau panas dengan menggunakan proses konveksi. Ini adalah yang paling dapat diandalkan daripada heat sink aktif; dan, untuk operasi yang efisien dari heat sink pasif, dianjurkan untuk menjaga aliran udara yang terus-menerus di sirip mereka.

- Pendingin Aluminium

Heat sink umumnya terbuat dari logam; dan, aluminium merupakan logam yang paling umum digunakan di sink. Kita menyadari fakta bahwa konduktivitas termal dari masing-masing logam adalah berbeda-beda. Konduktivitas termal logam sebanding dengan perpindahan panas di heat sink. Dengan demikian, jika konduktivitas termal logam meningkat, maka kapasitas heat sink juga akan meningkat. Konduktivitas termal aluminium adalah 235 W / mK ; itu adalah logam yang termurah dan ringan. Aluminium heat sink juga disebut sebagai heat sink diekstrusi karena mereka dapat dibuat menggunakan ekstrusi.

- Stamped Heat Sinks

Ini terbuat dari logam yang dicap untuk membentuk bentuk tertentu. Cap ini menciptakan heat sink setiap kali logam dipindahkan melalui

mesin stamping. Ini lebih murah dibandingkan dengan ekstrusi heat sink. Ini digunakan untuk aplikasi daya rendah dan karenanya ini rendah dalam hal kinerja.

- **Machining Heat Sinks**

Ini diproduksi oleh proses pemesinan; gergaji sering digunakan untuk menghapus blok bahan untuk membuat antar sirip dengan jarak yang tepat. Ini mahal seperti banyak logam yang pemborosan dalam proses manufaktur.

- **Berikat-Fin Heat Sinks**

Ini sering digunakan untuk aplikasi besar secara fisik yang membutuhkan kinerja yang masuk akal seperti las listrik dan aplikasi bata DC-DC. Ini dibuat oleh ikatan sirip individu logam ke dasar heat sink. Hal ini dapat dilakukan dengan dua metode yaitu epoxy termal yang ekonomis dan yang lainnya adalah dengan mematri yang mahal.

- **Bonded-Fin Heat Sinks**

Bonded-fin heat sink memiliki luas permukaan yang besar, dan memiliki bahan heat sink, dan karenanya, mereka memiliki kinerja yang sangat tinggi dan kepadatan panas fluks sangat tinggi. Pada heat sink ini, udara diarahkan mengalir langsung ke heat sink melalui beberapa jenis saluran. Hal ini yang membuat mahal karena biaya produksi dan saluran termasuk dalam biaya keseluruhan sink.

- **Skived Heat Sinks**

Proses Skiving digunakan untuk pembuatan sink ini, yang dapat membuat blok yang sangat halus dari logam umumnya tembaga. Oleh karena itu, ini disebut sebagai skived heat sink. Ini adalah media untuk berkinerja tinggi.

- **Forged Heat Sinks**

Logam seperti tembaga dan aluminium yang digunakan untuk membentuk heat sink dengan menggunakan kekuatan tekan. Proses

ini disebut sebagai proses penempaan. Oleh karena itu, mereka disebut sebagai forged heat sink.

- Single Fin Assembly Heat Sinks

Ini bersifat ringan dan dapat diinstal di ruang rapat. Mereka memiliki kemampuan berkinerja tinggi yang rendah, dan dapat digunakan untuk banyak aplikasi. Tapi kelemahan utama adalah bahwa heat sink jenis ini sedikit mahal.

- Swaged Heat Sinks

Merupakan proses penempaan dingin tetapi kadang-kadang dapat dilakukan bahkan proses kerja panas di mana dimensi item yang diubah menjadi mati. Heat sink tipe ini murah, media performing dan terbatas dalam pengelolaan aliran udara.

2.4 Fluida Penyimpan Panas

Fluida pentransfer panas membawa panas dari kolektor surya pada *thermal storage* tenaga surya. Ketika memilih cairan pentransfer panas, kriteria yang harus mempertimbangkan sebagai berikut:

- Koefisien ekspansi - perubahan fraksional panjang bahan (atau kadang-kadang dalam volume) tiap suatu unit perubahan suhu.
- Viskositas - merupakan ukuran kekentalan fluida yang menyatakan besar kecilnya gesekan di dalam fluida.
- Kapasitas termal - kemampuan materi untuk menyimpan panas.
- Titik beku - suhu dimana cairan berubah menjadi padat.
- Titik didih - suhu dimana cairan mendidih.
- Titik nyala - suhu terendah dari suatu larutan dimana akan timbul penyalaan api sesaat, apabila pada permukaan larutan tersebut didekatkan pada nyala api.

Misalnya, dalam iklim dingin, sistem pemanas air tenaga surya membutuhkan cairan dengan titik beku yang rendah. Cairan pada suhu tinggi, seperti pada iklim gurun, harus memiliki titik didih tinggi. Viskositas dan kapasitas termal menentukan jumlah energi yang dibutuhkan untuk memompa

cairan. Cairan dengan viskositas rendah dan panas spesifik yang tinggi lebih mudah untuk dipompa, karena mendapat lebih sedikit hambatan saat mengalir dan mentransfer lebih banyak panas. Sifat-sifat lain yang akan membantu menentukan efektivitas cairan adalah sifat korosif dan stabilitasnya.

Pada Fluida Penyimpanan panas terdapat resistansi waktu atau dapat dikatakan laju penurunan temperatur yaitu ketahanan fluida dalam menyimpan panas. Masing-masing bahan cair memiliki kalor jenis yang berbeda-beda. Kalor jenis ini akan berpengaruh terhadap kecepatan perubahan suhu dari suatu fluida (Çengel dan Turner 2001). Dapat diketahui bahwa setiap jenis bahan mempunyai kemampuan yang berbeda-beda dalam menghantarkan panas dan menerima panas sehingga perubahan suhu setiap jenis zat juga berbeda-beda. Secara umum proses pindah panas pada suatu bahan, bergantung dari jenis zat dan nilai konduktivitasnya. Bahan cair lebih cepat meneruskan atau menerima panas dibandingkan benda padat. Selain itu pada bahan cair proses yang terjadi adalah konveksi sehingga proses perpindahan panas lebih cepat. Nilai massa jenis pun ikut mempengaruhi kecepatan atau laju pindah panas (Dewitt 2002).

Dalam penelitian ini menggunakan fluida penyimpanan panas yaitu, parafin, *lubricant oil* dan *vegetable oil*. Pada fluida ini umumnya akan mengalami penurunan temperatur. Penyebab turunnya temperatur ini adalah berkurangnya energi matahari yang diterima oleh kolektor sehingga tidak mampu mengimbangi rugi-rugi energi ke lingkungan. Intensitas radiasi yang besar menyebabkan tingginya temperatur fluida keluar dari kolektor sehingga selisih temperatur dengan fluida didalam *thermal storage* adalah besar. Hal ini mengakibatkan perpindahan kalornya juga besar. Semakin lama temperatur fluida penyimpanan panas semakin naik secara lambat dan berfluktuasi. Semakin lama waktu berjalan, semakin besar energi thermal yang diserap dari energi matahari yang dan dipindah ke *thermal storage fluid*. Bertambah besarnya temperatur thermal storage mengakibatkan terjadinya terjadinya proses perpindahan kalor dari matahari ke dalam thermal storage. Lambatnya kenaikan temperatur fluida penyimpanan panas disebabkan oleh rendahnya konduktivitas termal dari fluida tersebut. Dan juga disebabkan oleh berubah-ubahnya intensitas radiasi matahari. Intensitas radiasi

yang tinggi menyebabkan kecepatan kenaikan temperatur fluida penyimpanan lebih besar yang akhirnya meningkatkan kecepatan temperatur fluida didalam tempat penyimpan panas. Kehilangan energi termal pada *thermal storage* disebabkan oleh adanya perpindahan kalor konduksi dan konveksi. Laju perpindahan kalor konduksi dipengaruhi oleh perbedaan temperatur antara permukaan dalam dan permukaan luar *thermal storage*. Laju perpindahan kalor konveksi tergantung oleh perbedaan temperatur antara permukaan luar *thermal storage* dan udara luar.

2.4.1 Parafin

Paraffin liquid merupakan minyak mineral hidrokarbon yang mengandung jumlah rantai C14 – C18. Pemerian paraffin liquid berupa cairan minyak kental tembus cahaya atau agak buram; tidak berwarna atau putih; tidak berbau; tidak berasa; agak berminyak. Paraffin liquid praktis tidak larut dalam air dan dalam etanol; mudah larut dalam minyak menguap, dalam hampir semua jenis minyak lemak hangat; sukar larut dalam etanol absolut. Sifat paraffin liquid yang menjadi permasalahan dalam sediaan adalah teroksidasi dengan pemanasan dan cahaya membentuk senyawa peroksida dan karboksilat yang memiliki bau dan rasa.

Penggunaan paraffin liquid dalam sediaan farmasi, baik sebagai zat aktif maupun sebagai pembawa, perlu ditambahkan antioksidan. Dalam pengujian ini, parafin murni adalah (n-octadecane/C18H18) digunakan sebagai bahan penyimpan panas yang merupakan senyawa hidrokarbon organik dengan n-alkana sebagai komponen utama dan memiliki perilaku *thermophysic* seperti yang ditunjukkan dalam tabel 2.

Tabel 2. Sifat Fisik Parafin

Titik Leleh , °C	46,7
Konduktivitas Termal (padat), W/m. °C	0,1383
Konduktivitas Termal (Cair), W/m. °C	0,1383
Panas Spesifik (padat), J/Kg.K	2890
Panas Spesifik (cair), J/Kg.K	2890
Densitas (padat), kg/m ³	947
Densitas (cair), kg/m ³	750
Panas Laten, J/Kg	209000

Titik Didih, °C	250
-----------------	-----

2.4.2 Oli (minyak pelumas)

Berdasarkan wujudnya, minyak pelumas dapat digolongkan menjadi dua bentuk, yaitu cair (liquid) atau biasa disebut oli, dan setengah padat (semi solid) atau biasa disebut gemuk. Pelumas adalah [zat kimia](#), yang umumnya [cairan](#), yang diberikan di antara dua benda bergerak untuk mengurangi [gaya gesek](#). Zat ini merupakan fraksi hasil destilasi minyak bumi yang memiliki suhu 105-135 derajat celcius. Pelumas berfungsi sebagai lapisan pelindung yang memisahkan dua permukaan yang berhubungan. Umumnya pelumas terdiri dari 90% [minyak](#) dasar dan 10% zat tambahan. Salah satu penggunaan pelumas paling utama adalah [oli mesin](#) yang dipakai pada [mesin pembakaran dalam](#).

Tabel 3. Sifat Fisik Oli

Specific Gravity (60 °F/60 °F)	0.8961
Viskositas Kinematik pada 100 °F	212.80
Titik nyala, °C	254.00
Titik api, °C	286.00
Densitas, gr/cm ³	0.8867
Panas Spesifik, J/Kg. K	2219
Konduktivitas termal, W/m. °C	0.107
Titik Didih, °C	>300

2.4.3 Minyak Sayur

Vegetable oil atau yang biasa disebut Minyak Sayur atau disebut juga lemak sayur merupakan bahan yang dihasilkan dari sumber tumbuhan yang dikenali sebagai pokok biji minyak. Bahan ini terdiri dari trigliserida. kebanyakan bagian tumbuhan mampu menghasilkan minyak, bagi tujuan perdagangan minyak dihasilkan terutamanya dari biji benih pokok biji berminyak karena kandungan minyak dalam tumbuhan paling tinggi terdapat dalam benih. Pada dasarnya, minyak merupakan cairan pada suhu balik, dan lemak adalah pepejal yaitu lemak rapuh yang padat yang dikenal sebagai lilin. Perbedaan berdasarkan suhu antara minyak dan lemak kurang tepat, karena adanya perbedaan suhu balik, dan

biasanya setiap bahan mempunyai titik lebur. Minyak sawit berwujud setengah padat pada temperatur ruangan.

Pada percobaan ini menggunakan minyak wijen. Keunikan minyak wijen adalah, minyak ini tak hanya mengandung asam lemak tak jenuh tunggal tapi juga polyunsaturated atau yang lebih dikenal dengan asam lemak omega-6. Titik didih minyak ini lebih tinggi dibandingkan kedua jenis minyak sebelumnya, yaitu sekita 210-220°C. Minyak wijen biasa digunakan pada campuran masakan untuk menambah rasa menjadi lebih enak.

Tabel 4. Sifat Fisik Minyak Wijen

Densitas relatif, $\text{g/cm}^3/\text{air}$ pada 20°C	0.914 – 0,917
Viskositas kinematik pada 20 °C, mm^2/sec	78,2
Titik abu, °C	220 – 230
Titik nyala, °C	275 – 290
Panas Spesifik, J/gr K	1.910 – 1.916
Konduktivitas termal, W/m. K	0.179 – 0.188
Titik Didih, °C	210 – 220

