

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

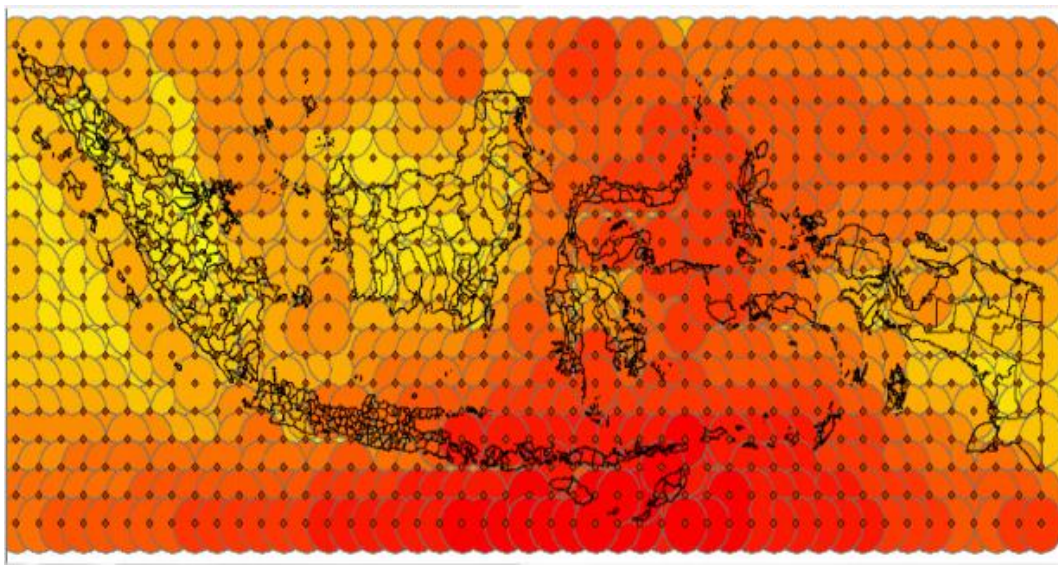
2.1 Energi Matahari

Matahari yang berjarak sekitar $1,5 \times 10^{11}$ m dari bumi mempunyai diameter $1,39 \times 10^9$ m dan terdiri atas materi-materi gas yang sangat panas dengan suhu permukaan yang mencapai 5.672 K. Pada bagian inti selalu terjadi reaksi fusi yang menghasilkan energi pada *temperature* yang sangat tinggi. Energi ini harus dilepaskan ke permukaan dan kemudian diradiasikan ke materi disekitarnya, termasuk bumi. Besarnya energi radiasi surya persatuan waktu yang diterima permukaan persatuan luas tegak lurus terhadap arah rambatan radiasi surya pada jarak rata-rata bumi-surya di luar atmosfer dinamakan konstanta surya, G_{sc} yang besarnya adalah 1367 W/m^2 . Nilai ini merupakan batas atas teoritis dari ketersediaan energi surya di bumi (Mecherikunnel, 1980).

Energi surya terpancar hingga ke bumi berupa paket-paket energi yang disebut foton. Total kekuatannya mencapai $3,83 \times 10^{23}$ kilowatt (kW). Namun demikian sebagian besar dari radiasi ini hilang di angkasa. Radiasi surya dipancarkan dari fotosphere matahari pada temperatur 6000 K, yang memberikan distribusi spektrumnya mirip dengan distribusi spectrum black body. Dengan melalui atmosfer bumi, radiasi surya diatenuasikan oleh berbagai partikel diantaranya molekul udara, aerosol, partikel debu, dll.

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).

Energi thermal dari cahaya matahari adalah jenis energi yang terbarukan. Panjang gelombang radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi berada pada daerah 0,29 sampai 2,5 μm . emisi radiasi dari matahari ke bumi menghasilkan intensitas radiasi surya yang hampir tetap diluar atmosfer bumi. Solar Constant (konstanta surya) $G_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$ (World Radiation Center (WRC)) merupakan energi dari matahari setiap satuan waktu yang diterima suatu satuan area permukaan tegak lurus dengan arah perambatan radiasi pada jarak rata-rata bumi-matahari, di luar atmosfer.



Gambar 1. Pembobotan area peta yang tidak memiliki data radiasi surya

2.1.1 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 keadaan 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 absorpsivitas berlainan untuk sudut datang radiasi yang berlainan. Menurut *British Building Research* untuk sudut datang dibawah 75o, harga absorpsivitas terletak antara 0,8 sampai 0,9 dari absorpsivitas yang dimiliki oleh suatu benda.

Absorpsivitas 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.

2.1.2 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 2.1 Potensi Energi Surya

Kelas	Iradiasi surya perhari (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)

2.1.3 Teori perpindahan panas

Perpindahan Kalor(heat transfer) adalah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu antara benda atau material(Ahlul halli, 2012). Dimana energi yang dipindah itu dinamakan kalor (heat). Kalor diketahui dapat berpindah dari tempat lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Hukum percampuran kalor juga terjadi karena kalor itu berpindah, sedangkan pada kalorimeter, perpindahan kalor dapat terjadi dalam bentuk pertukaran kalor dengan luar sistem. Jadi pemberian atau pengurangan kalor tidak saja mengubah temperatur atau fasa zat suatu benda secara okal, melainkan kalor itu merambat ke tau dari bagian lain benda atau tempat lain

Menurut penelitian, perpindahan tenaga kalor dapat dibagikan dalam beberapa golongan perpindahan, kalor itu dapat merambat dari suatu bagian kebagian yang lain melalui zat atau benda yang diam, kalor juga dapat dibawa oleh partikel-partikel yang mengalir. Pada radiasi kalor, tenaga berpindah melalui pancaran yang merupakan juga satu cara perpindahan kalor. Umumnya

perpindahan kalor berlangsung sekaligus dengan ketiga cara ini. perpindahan kalor melalui cara melalui cara pertama disebut perpindahan kalor melalui konduksi. Cara kedua perpindahan kalor melalui konveksi dan cara ketiga melalui radiasi.

2.1.3.1 Teori perpindahan panas

Perpindahan Kalor(heat transfer) adalah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara benda atau material(Ahlul halli, 2012). Dimana energi yang dipindah itu dinamakan kalor (heat). Kalor diketahui dapat berpindah dari tempat lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Hukum percampuran kalor juga terjadi karena kalor itu berpindah, sedangkan pada kalorimeter, perpindahan kalor dapat terjadi dalam bentuk pertukaran kalor dengan luar sistem. Jadi pemberian atau pengurangan kalor tidak saja mengubah temperatur atau fasa zat suatu benda secara okal, melainkan kalor itu merambat ke tau dari bagian lain benda atau tempat lain. Menurut penelitian, perpindahan tenaga kalor dapat dibagikan dalam beberapa golongan perpindahan, kalor itu dapat merambat dari suatu bagian kebagian yang lain melalui zat atau benda yang diam, kalor juga dapat dibawa oleh partikel-partikel yang mengalir. Pada radiasi kalor, tenaga berpindah melalui pancaran yang merupakan juga satu cara perpindahan kalor. Umumnya perpindahan kalor berlangsung sekaligus dengan ketiga cara ini. perpindahan kalor melalui cara melalui cara pertama disebut perpindahan kalor melalui konduksi. Cara kedua perpindahan kalor melalui konveksi dan cara ketiga melalui radiasi.

kalor dari dari suatu bagian benda bertemperatur lebih tinggi akan mengalir melalui zat benda itu kebagian kebagian lainnya yang bertemperatur lebih rendah. Zat atau partikel zat dari benda yang dilalui kalor ini sendiri tidak mengalir sehingga kalor ini berpindah dari satu partikel ke partikel dan mencapai bagian yang dituju. Perpindahan kalor cara ini disebut konduksi dan itu mempunyai sifat konduksi kalor. Konduksi kalor ini bergantung kepada zat yang dilaluinya dan juga kepada distribusi temperatur dari bagian benda. Berlangsungnya konduksi kalor melalui zat dapat diketahui perubahan yang terjadi. Perpindahan panas secara konduksi tidak hanya terjadi pada padatan saja

tetap bisa juga terjadi pada cairan ataupun gas, hanya saja konduktivitas terbesar apa pada padatan jadi;

Jika media perpindahan panas konduksi berupa gas, molekul-molekul gas yang suhunya tinggi akan bergerak dengan kecepatan lebih tinggi daripada molekulgas yang suhunya lebih rendah. Jika media perpindahan panas konduksi berupa cairan, mekanisme perpindahan panas yang terjadi sama dengan konduksi dengan media gas. Tetapi jarak antara molekul-molekul pada cairan lebih pendek dari pada jarak antara molekul-molekul pada fase gas.

2.2 Lensa Fresnel

2.2.1 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 konzentror lensa fresnel untuk aplikasi *stirling engine*.

2.2.2 Prinsip kerja kolektor terkonsentrasi

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 konzentror harus diketahui luasan bukaan/penangkapan (*aperture area*) dari konzentror 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 konzentror 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*).

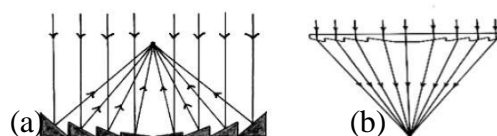
Untuk kolektor surya tipe konsentrasi, intensitas radiasi surya yang diperhitungkan adalah *direct/beam/normal irradiance* dimana dapat diperoleh dengan pengukuran langsung dengan alat

2.2.3 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)

2.2.4 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*. Gambar 2. menunjukkan gambar skematik dari tipe fresnel



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

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

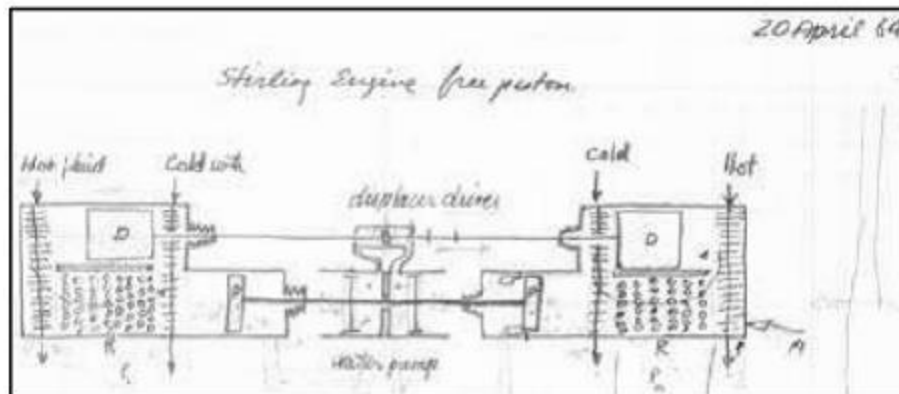
Fresnel juga diklasifikasi menjadi *imaging lens* (3D-lens) dan *non-imaging lens* (2D-lens). Perbedaan dari kedua tipe ini adalah bentuk bidang fokusnya. Lensa *imaging* berupa fokus titik (*focal point*) sedangkan tipe *non-imaging* berupa garis (*line/linear focus*) di sepanjang sumbu dari *reflektor cylindrical parabolic*.

2.3 Sejarah Singkat Mesin Stirling

Penemu dari mesin stirling adalah Robert Stirling (1790 – 1878), beliau adalah *preacher* (pendeta) dan penemu. Beliau juga merupakan menteri gereja negara Skotlandia pada saat itu yang tertarik pada kesehatan fisik dan keselamatan dari jemaah gerejanya dalam rangka untuk kebaikan jiwanya.

2.3.1 Penemuan Mesin Stirling

Beliau menemukan mesin stirling (yang beliau sebut “*air engine*”) karena mesin uap pada masa itu seringkali meledak, membunuh dan melukai orang-orang yang berada didekat mesin uap tersebut pada saat meledak. Mesin yang dibuat Robert Stirling lebih aman dengan alasan tidak akan meledak, dan mesin-mesin tersebut memproduksi daya yang lebih besar daripada mesin uap pada saat itu. Pada tahun 1816, stirling menerima hak paten pertama dari tipe baru “*air engine*” mesin yang ia bangun, dan mesin-mesin selanjutnya yang mengikuti, pada saat ini menjadi dikenal sebagai “*hot air engine*”. Mesin-mesin tersebut terus disebut sebagai “*hot air engine*” sampai tahun 1940-an, ketika gas lain seperti helium dan hydrogen digunakan sebagai fluida kerja. Saudara laki-laki dari Robert, James Stirling, juga mempunyai peran penting dalam pengembangan dari mesin stirling/*Stirling Engine*.



Gambar 3. Sketsa penemuan Robert Stirling

Tetapi, seiring dengan ditemukannya motor bakar pembakaran dalam pada akhir abad -19 dan banyaknya penggunaan motor listrik, maka motor stirling ini pun semakin dilupakan.

2.3.2 Pengembangan Mesin Stirling

Sejak awalnya mesin stirling memiliki reputasi kerja yang baik dan masa kerja yang lama (diatas 20 tahun), antara lain digunakan sebagai mesin pompa air dengan kapasitas rendah, yaitu pada pertengahan abad ke sembilan belas sampai sekitar tahun 1920, yaitu ketika mesin pembakaran internal dan motor listrik mulai menggantikannya. Mesin dengan udara panas (*hot air engine*) dikenal karena cara kerjanya yang mudah. Kemampuannya menggunakan berbagai jenis bahan bakar, selain itu operasinya aman, tidak berisik, efisiensi memadai (*moderate*), stabil dan rendah biaya perawatannya. Kekurangannya adalah ukurannya yang sangat besar namun daya keluarannya (*output*) kecil dengan harga investasinya tinggi/mahal (untuk ukuran saat itu)

Lepas daripada itu, karena operasi 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 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.

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.

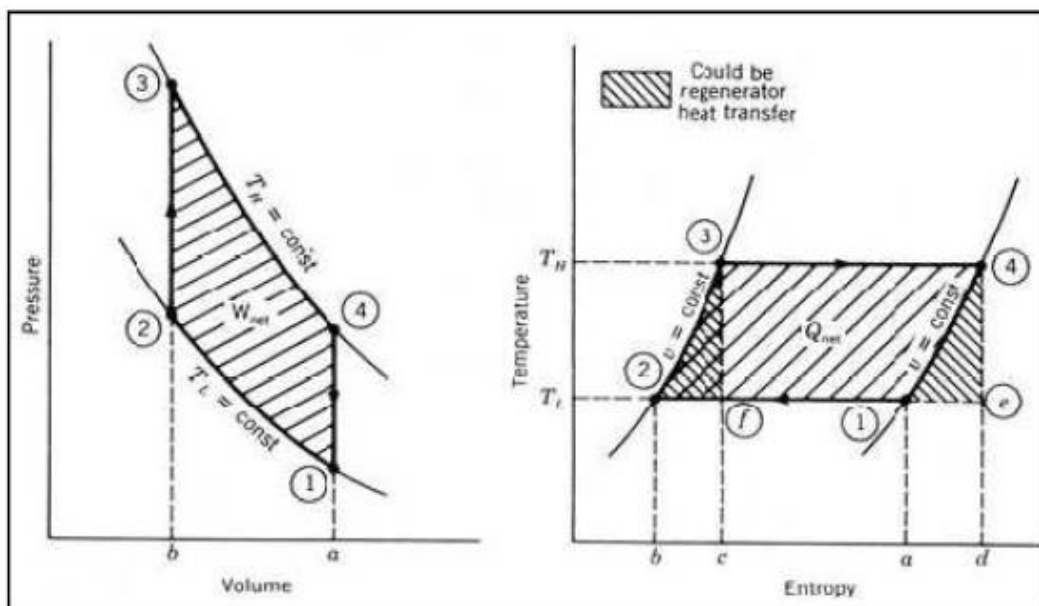
Mesin Stirling generasi baru ini jauh lebih kuat, lebih efisien, tidak berisik, mudah penggunaannya, dan memiliki daya tahan yang lebih tinggi, serta mudah diproduksi secara massal. Digunakan antara lain untuk mesin pembangkit listrik, mesin pendingin, mesin pompa dll.

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).

2.3.3 Siklus Stirling

Gambar 4 memperlihatkan siklus stirling ideal. Siklus ini terdiri dari 4 (empat) proses yang dikombinasikan menjadi sebuah 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 proses isothermalnya saja. Untuk memfasilitasi kontinuitas kerja dari dan menuju sistem, sebuah *flywheel* harus diintegrasikan dalam rancangan mesin stirling. Flywheel berguna sebagai *storage device* untuk energi. Dalam siklus ini, panas harus ditransmisikan dalam seluruh prosesnya. (Borgnakke et al, 2003).



Gambar 4. Siklus stirling ideal dalam diagram P - v dan diagram T - s

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

didiagram T-S. Regenerator dapat digunakan untuk mengambil panas dari fluida kerja diproses 4-1 dan mengembalikan lagi panas dalam proses 2-3. Siklus *Carnot* memperlihatkan efisiensi teoritik dari sebuah siklus termodinamika.

Proses siklus stirling ideal :

➤ Proses 1-2 : Kompresi Isothermal

Piston pada silinder panas memberikan kerja pada fluida kerja dan mengompresikannya secara isothermal pada temperatur dingin. Pada saat hal yang sama terjadi juga pembuangan kalor ke lingkungan. Karena fluida kerja bertekanan rendah pada saat itu, diperlukan kerja yang lebih sedikit untuk mengompresikan daripada kerja yang dihasilkan pada proses ekspansi.

- Pembuangan panas ke silinder dingin
- $Q_{12} = \text{area } 1 - 2 - b - a$ pada diagram T-s
- Fluida kerja dikenai kerja, (pertukaran energi dari flywheel)
- $W_{12} = \text{area } 1 - 2 - b - a$ pada diagram P-v

➤ Proses 2-3 : Kompresi Isokhorik

Piston mentransfer fluida kerja secara isochoric melewati regenerator menuju silinder panas. Kalor dihantarkan ke fluida kerja ketika gas melewati regenerator, mengakibatkan naiknya temperatur fluida kerja ketika masuk ke silinder panas.

- Pemasukan panas (pertukaran energi dari regenerator)
- $Q_{23} = \text{area } 2 - 3 - c - b$ pada diagram T-s
- $W_{23} = 0$

➤ Proses 3-4 : Ekspansi Isothermal

Fluida kerja dengan tekanan tinggi menyerap panas dari area panas dan mengekspansikannya secara isothermal, hal ini mengakibatkan kerja pada piston.

- Panas ditransferkan dari sumber panas
- $Q_{34} = \text{area } 3 - 4 - d - c$ pada diagram T-s
- Kerja dilakukan oleh fluida kerja (pertukaran energi ke flywheel)

- $W_{34} = \text{area } 3 - 4 - a - b$ pada diagram P-v

➤ Proses 4-1 : Kompresi Isokhorik

Piston ekspansi mentransfer fluida kerja secara isokhorik melewati regenerator ke sisi dingin (silinder dingin) dari mesin. Kalor diserap dari fluida kerja ketika fluida kerja melewati regenerator, hal ini juga membuat temperatur fluida kerja menurun pada saat menuju silinder dingin.

- Pelepasan kalor (pertukaran energi ke regenerator)
- $Q_{41} = \text{area } 1 - 4 - d - a$
- $W_{41} = 0$

2.3.4 Jenis - Jenis Mesin Stirling

a. Berdasarkan Penggunaannya.

Beberapa jenis stirling engine yang berdasarkan penggunaan yaitu sebagai berikut:

1. Crank-drive Stirling Engine. Mesin jenis ini pembuatan dan operasinya mudah, tidak menggunakan pelumas (oli) pada crankcase nya. Untuk mencegah masuknya oli ke ruang engkol, digunakan jenis bantalan : sealed roller bearings, ball bearings atau bushing dari bahan teflon yang tidak dipublikasi. Daya (energi) diperoleh dari gerakan maju-mundurnya piston (system linier). Untuk operasinya diperlukan bahan bakar.
2. Simple Free-Piston Engine. Bekerja dengan udara atmosfer sebagai bahan bakar kerjanya, dan putarannya sangat rendah. Kelebihan jenis mesin ini adalah daya angkat dan efisiensinya sangat tinggi . Digunakan biasanya untuk pompa (displacement pump). Mesin dengan displacer berdiameter 60 cm, dengan putaran 1 rotasi per detik (cycle per second), mampu menghasilkan daya sekitar 500 watt (50 liter-meter/sec)
3. Duplex Stirling Engine, untuk mesin freezer penyimpan bahan makanan yang portable.
4. Free-Piston Alternator Engine. Digunakan antara lain dalam pengembangan Stirling engine pembangkit listrik yang digerakkan dengan bantuan panas surya

(matahari). Kapasitas daya sampai 20 kw. Dalam beberapa tahun ke depan diharapkan akan lebih besar lagi kapasitasnya.

b. Berdasarkan konfigurasi mekanik.

1. Stirling tipe alpha (α)

Stirling tipe alpha(α) ini mempunyai dua silinder terpisah yang terhubung secara seri dan di antaranya terdapat regenerator yang berfungsi menaikkan efisiensi. Silinder disebut silinder panas atau “hot cylinder” dan yang lainnya disebut silinder dingin atau “cold cylinder”. Stirling engine tipe ini merupakan stirling engine modern.

2. Stirling engine tipe beta(β)

Stirling engine dengan tipe ini merupakan tipe klasik dan cukup populer bersama dengan konfigurasi gamma(γ). Motor yang dibuat oleh Robert Stirling pada tahun 1816 menunjukkan bahwa motor tersebut menggunakan konfigurasi beta(β). Baik stirling engine tipe beta(β) dan gamma(γ) menggunakan displacer. Hanya bedanya tipe beta(β), displacer dan power piston berada dalam satu silinder yang sama, sedangkan gamma(γ) terpisah. II-10 Gambar

3. Stirling engine tipe gamma(γ)

Stirling engine tipe ini bisa disebut juga penyederhanaan stirling engine tipe beta(β) dimana displacer dan power piston berada di silinder yang berbeda, tetapi masih terhubung dengan flywheel yang sama. Fluida kerjanya dapat dengan bebas bergerak di antara kedua silinder tersebut.

2.3.5 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

2.4 Laju Penurunan Temperatur Fluida

Pada Fluida Penyimpan 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 penyimpan 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 penyimpan

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 penyimpan 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 penyimpanan 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 Fluida Penyimpan Panas

Cairan pentransfer panas membawa panas dari kolektor surya ke tangki penyimpanan air panas pada sistem pemanas air 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.

2.4.2 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 2.2

Tabel 2.2 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

2.6 Pengertian Generator

Generator merupakan mesin yang menggunakan magnet untuk mengubah energi mekanis menjadi energi listrik (Zuhal, 1991). Generator magnet permanen sangat efisien karena mampu bekerja baik pada kecepatan putar yang rendah, kemudahan dalam pembuatan dan juga scale up generator magnet permanen sangat mudah dalam mendesain generator dengan kapasitas daya, tegangan, dan kecepatan kerja tertentu dengan mengubah parameter seperti kekuatan fluks magnet, jumlah kumparan dan belitannya, jumlah magnet serta ukuran diameter kawat (Hariyotejo P, 2009).