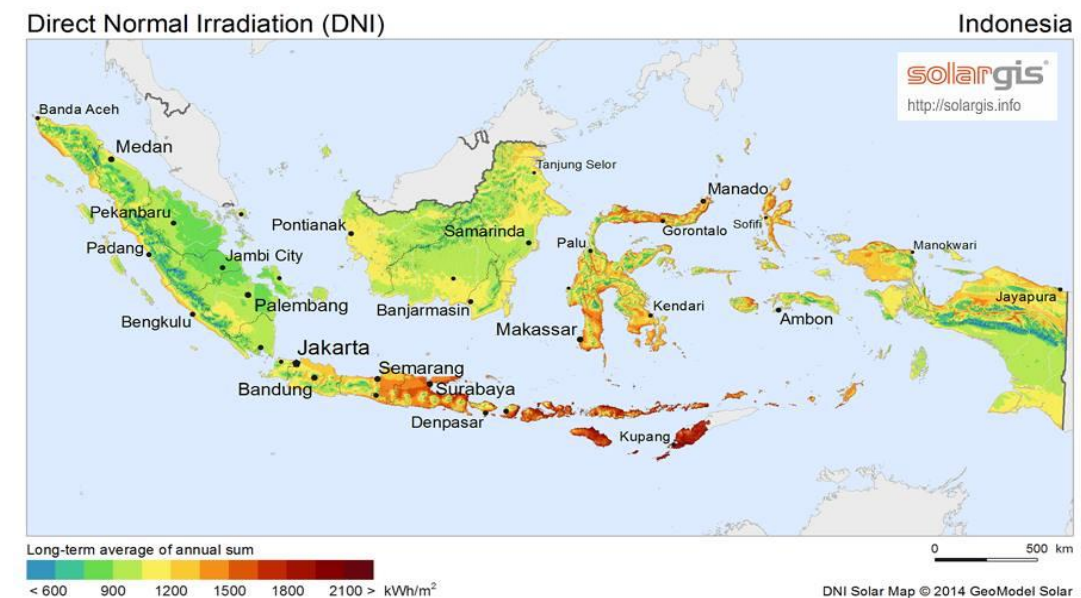


## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 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  $1325 \text{ W/m}^2$  sampai  $1412 \text{ W/m}^2$ . Nilai rata-ratanya disebut sebagai konstanta matahari dengan nilai  $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ .

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  $1000 \text{ W/m}^2$  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  $1400 \text{ W/m}^2$  untuk jangka pendek (Darmanto, 2011).



Gambar 1. Direct Normal Irradiation

(Sumber: DNI Solar Map)

### 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 O<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, dan CO<sub>2</sub>)
- 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 ( $\rho$ ), absorptivitas ( $\alpha$ ), dan transmisivitas ( $\tau$ ).

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  $75^\circ$ , 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.

### **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 km<sup>2</sup> rata-rata sebesar 5,10 mW atau 4,8 kWh/m<sup>2</sup>/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 perhari (kWh/m <sup>2</sup> )	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<sup>2</sup>)

A = Luas area (m<sup>2</sup>)

## 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).<sup>[5]</sup> Seorang fisikawan Skotlandia, Sir David Brewster, memperkenalkan lensa ini untuk digunakan pada seluruh mercusuar di daratan Inggris.

Lensa atau sering disebut kanta adalah sebuah alat untuk mengumpulkan atau menyebarkan cahaya, biasanya dibentuk dari sepotong gelas yang dibentuk. Alat sejenis digunakan dengan jenis lain dari radiasi elektromagnetik juga disebut lensa, misalnya, sebuah lensa gelombang mikro dapat dibuat dari "paraffin wax".

Lensa paling awal tercatat di Yunani Kuno, dengan sandiwara Aristophanes *The Clouds* (424 SM) menyebutkan sebuah gelas-pembakar (sebuah lensa cembung digunakan untuk memfokuskan cahaya matahari untuk menciptakan api).

Tulisan Pliny the Elder (23-79) juga menunjukkan bahwa gelas-pembakar juga dikenal Kekaisaran Roma, dan disebut juga apa yang kemungkinan adalah sebuah penggunaan pertama dari lensa pembetul: Nero juga diketahui menonton gladiator melalui sebuah emerald berbentuk cekung (kemungkinan untuk memperbaiki myopia).

Seneca the Younger (3 SM - 65) menjelaskan efek pembesaran dari sebuah gelas bulat yang diisi oleh air. Matematikawan muslim berkebangsaan Arab Alhazen (Abu Ali al-Hasan Ibn Al-Haitham), (965-1038) menulis teori optikal pertama dan utama yang menjelaskan bahwa lensa di mata manusia membentuk sebuah gambar di retina. Penyebaran penggunaan lensa tidak terjadi sampai penemuan kaca mata, mungkin di Italia pada 1280-an.

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*.

### **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 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/ dirrect/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, intensitasi radiasi surya yang diperhitungkan adalah *direct/beam/normal irradiance* dimana dapat diperoleh dengan pengukuran langsung dengan alat

### **2.2.3 Sejarah singkat lensa fresnel**

Konsep yang ditemukan

Fresnel pada mulanya adalah seorang yang belajar dalam bidang teknik (engineering), namun kembali menekuni bidang optik. Banyak hal yang telah ia kemukakan namun hal tersebut merupakan hasil kerjasama dengan orang lain. Adapun salah satu penemuan dari Fresnel yang saat ini terkenal adalah sebuah bentuk lensa cembung yang bentuknya berbeda dengan dari lensa cembung pada umumnya dan lensa ini kemudian dikenal dengan lensa fresnel . Dalam keadaan tertentu, lensa cembung dibutuhkan untuk membentuk bayangan sehingga berkas cahaya akan tampak mengumpul pada sebuah titik tertentu dan memiliki suatu intensitas yang ukup kuat. Namun ada kalanya apabila sumber cahaya berjarak amat dekat dengan lensa maka pengkonsentrasian berkas cahaya tidak akan terjadi. Padahal hal ini sangat dibutuhkan oleh alat-alat yang menggunakan prinsip pembiasan dengan menggunakan lensa cembung. Sebagai contoh adalah lampu penerangan, sistem proteksi pada alat-alat Proyektor kemudian pencahayaan pad lampu depan mobil atau pada suatu lampu sinyal. Bagian zone plate lensa fresnel

Perkembangan Konsep

optika sebagai satu cabang dalam ilmu fisika, memang telah menyusuri riwayat yang panjang.. Penglihatan manusia sendiri telah menjadi suatu kajian yang tidak ada habis-habisnya. Sekilas di atas telah dikemukakan riwayat perkembangan riset optika, Kalau dizaman kuno ada nama seperti Aristophanes, di abad pertengahan ada Galileo dan Newton, berikutnya juga ada Huygens dan

van Leeuwenhoek dalam bidang mikroskop, dan fresnel dan Doppler dalam Optika Gelombang.

Agustin Fresnel menyadari bahwa pengurangan dari berat dan ketebalan dari lensa itu dapat dibuat dengan memindahkan “bagian silindris” dari lensa seperti mengubah bentuk dari lensa ini namun tanpa mengubah cahaya dari hasil pembiasannya. Suatu ketika ide ini muncul dari sebuah lampu mercusuar. Ketika ini ia mengamati bahwa ada semacam bagian prisma bersusun yang mengelilingi lampu tersebut. hal inilah yang membuat mengapa lampu mercusuar dapat memancarkan cahaya begitu kuat meskipun dilihat dari jarak yang sangat jauh. Namun hal ini oleh Fresnel lebih disempurnakan lagi (sebenarnya pada mulanya yang ditemukan adalah sistem pencerminan tersebut) hingga lahirlah pembiasan dengan lensa Fresnel. Sifat gelombang cahaya dapat digambarkan dengan baik dengan menggunakan lensa Fresnel. Sifat gelombang cahaya dapat digambarkan dengan baik dengan menggunakan percobaan yang berhubungan dengan sifat cahaya seperti pada percobaan pembiasan misalnya. Adalah Thomas Young seorang penemu versi modern dari model gelombang cahaya yang telah menemukan interferensi pada cahaya sebelum Fresnel kembali melukiskan hal tersebut pada tahun 1815. Pada tahun 1818 Fresnel terus berupaya untuk mengembangkan suatu bentuk matematik untuk gelombang optik dan bersifat lebih mandiri dari apa yang pernah dikemukakan oleh Thomas Young dan hal ini memberikan sumbangan yang besar pada perkembangan dunia optik pada umumnya. suatu contoh dalam pemahaman yang diberikan oleh Fresnel akan efek gelombang cahaya adalah yang dinamakan “zone plate”. Hal ini menjadi dasar perhitungan dari lensa Fresnel tersebut. Sebuah sumber cahaya kecil dapat dipertimbangkan sebagai suatu titik yang memancarkan cahaya ke segala arah. Muka gelombang ada posisi manapun dapat dilukiskan sebagai suatu bagian daerah bundar dengan pusat tertentu dan daerah-daerah bundar yang berurutan menjadi makin membesar jaraknya terhadap pusat tertentu tadi. Hal inilah yang dipakai untuk menentukan tiap posisi dari daerah-daerah bundar selanjutnya, tentu dengan menggunakan perhitungan yang akurat. Dewasa ini lensa Fresnel (dan cermin Fresnel) menjadi sangat banyak digunakan dalam berbagai peralatan optik.

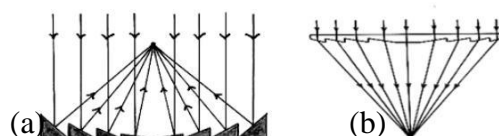


Sebab lensa ini memiliki kelebihan tertentu yaitu bentuknya yang relatif jauh lebih tipis dan lebih ringan dibandingkan dengan lensa cembung konvensional yang ada.

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*.Gbr 2.menunjukkan gambar skematikdari tipe fresnel



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

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

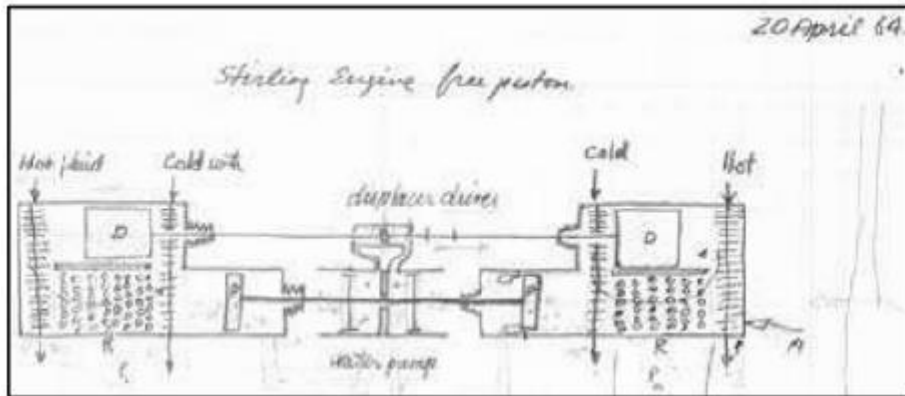
Fresnel juga diklasifikasi menjadi *imaging lens* (3D-lens) dan *non-imaging lens* (2D-lens). Perbedaan dari kedua tipe ini adalah bentuk bidang fokusnya. Lensa *imaging* berupa fokus titik (*focal point*) sedangkan tipe *non-imaging* berupa garis (*line/linear focus*) di sepanjang sumbu dari *reflektor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

(sumber: Leonida, 2008)

Tetapi, seiring dengan ditemukannya motor bakar pembakaran dalam pada akhir abad -19 dan banyaknya penggunaan motor listrik, maka motor stirling inipun 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).

### Mesin Stirling tenaga surya

Sebagaimana yang terlihat pada gambar di bawah ini, mesin Stirling Tenaga Surya (*Free-Piston Alternator Engine*) menggunakan tenaga surya sebagai pembangkit energi / “bahan bakarnya”. Sebagaimana telah disebutkan di atas, prinsip kerjanya adalah berdasarkan prinsip peredaran termodinamika (motor udara panas). Jadi pada mesin Stirling, gas hanya disusutkan dan kemudian dikembangkan dengan pemanasan dari luar. Sebagaimana kita ketahui, tenaga surya adalah termasuk salah satu sumber daya terbarukan (tidak pernah habis, sampai bermilyar-milyar tahun ke depan) yang paling ekonomis dan mudah didapatkan, gratis lagi. Dan hal ini merupakan nilai lebih dari mesin Stirling tenaga surya, ekonomis dan mudah pengoperasiannya. Mesin Stirling tenaga surya adalah termasuk salah satu dari jenis mesin hemat energi.

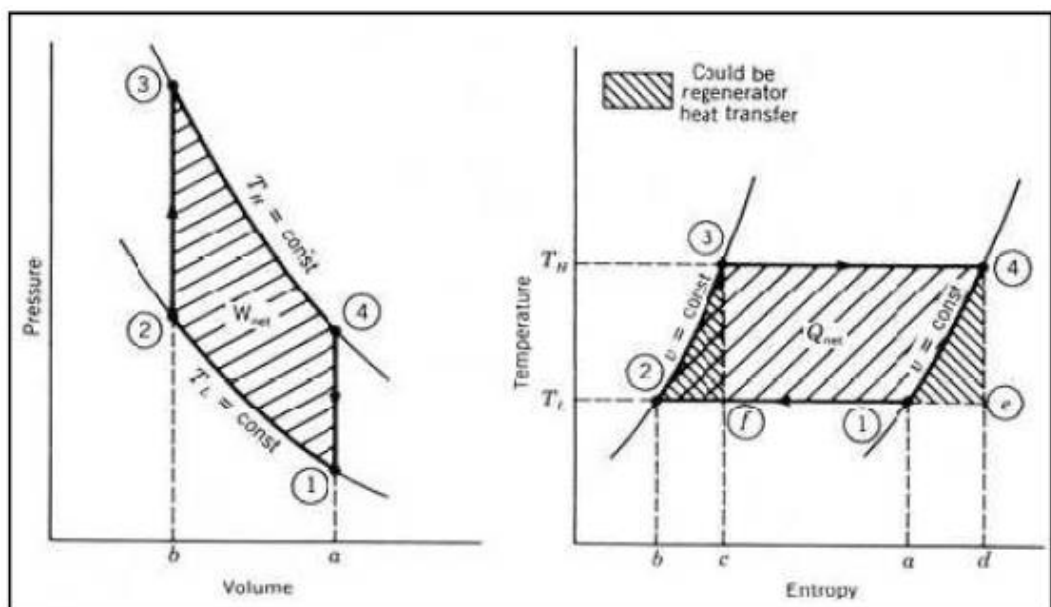
Mungkin yang agak mengganggu (dari segi konstruksi dan biaya) adalah sistem parabola sebagai reflektor sinar surya yang terfokus ke mesin stirling, yang terkopel dengan suatu generator listrik (selanjutnya kita sebut generator Stirling). Yang lazim kita ketahui adalah, piringan reflektor sinar pada parabola biasanya dibuat dari bahan yang memantulkan sinar seperti kaca, ataupun pelat logam dengan permukaan mengkilat . Untuk ukuran parabola yang kecil, tentunya tidak banyak masalah yang timbul, dan mungkin masih bisa ditekan biaya pembuatannya. Namun bagaimana bila diperlukan suatu ukuran yang lebih besar, katakan lebih dari 2-3 meter ? Sudah pasti akan menelan biaya produksi yang lebih mahal dan tidak ekonomis.

Ternyata seorang ilmuwan dari Jerman Barat, Prof. dr.Hans Kleinwachter (direktur Bomin Solar GmbH di Lorrach) menemukan ide membuat reflektor sinar surya yang tidak berat, tahan terhadap angin dan perubahan cuaca (hujan dsb). Dia

dengan tim yang terdiri atas beberapa insinyur dan konstruktor membuat reflektor ringan dari lembaran semacam plastik yang dilapisi dengan logam , yang ringan dan mampu memantulkan 80% sinar surya yang datang. Untuk melindungi dari terpaan hujan dan angin, ia membuat sebuah kubah tembus pandang yang bias melewatkan sinar. Dari 100% sinar surya yang datang, setidaknya 72% akan sampai ke titik baker reflector.

### 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.



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

(Sumber: Borgnakke, 2003).

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 mengembangkannya 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)
- $Q_{41} = \text{area } 1 - 4 - d - a$
- $W_{41} = 0$

Atau dengan kata lain, siklus stirling mempunyai kemungkinan efisiensi maksimum seperti halnya dengan efisiensi Carnot sesuai dengan hukum kedua termodinamika. Tetapi bagaimanapun, harus diingat bahwa motor stirling adalah mesin yang secara praktek dimana banyak faktor lain yang mempengaruhi perhitungan secara matematisnya.

### **2.3.4 Jenis - Jenis Mesin Striling**

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

#### **1. Tipe Alpha**

Dua piston “alpha” desain jenis memiliki piston dalam silinder terpisah, dan gas didorong antara ruang panas dan dingin. mesin Stirling alfa berisi kekuatan dua piston dalam silinder yang terpisah, satu berada didingin dan satunya berada dipanas. Silinder panas terletak di dalam suhu tinggi penghantar



panas (silinder yang dibakar) dan silinder dingin terletak di dalam displacer suhu rendah. Jenis mesin ini memiliki rasio power-to-volume tinggi, namun memiliki masalah teknis karena apabila suhu piston tinggi biasanya panas akan merambat ke pipa pemisah silinder. Dalam prakteknya, piston ini biasanya membawa isolasi yang cukup besar untuk bergerak jauh dari zona panas dengan mengorbankan beberapa ruang mati tambahan.

Sebagian besar gas berkerja dalam silinder panas, yang telah dipanaskan melalui dinding silinder panas dan mendorong piston panas ke bagian bawah (menarik udara). Dengan menarik udara dari bagian piston dingin. Pada titik  $90^\circ$  adalah titik balik dimana piston panas akan menjadi sebuah siklus mesin stirling. Gas sekarang pada volume maksimal. Piston didalam silinder panas mulai bergerak, dan sebagian besar gas panas masuk ke dalam silinder dingin, di mana mendingi dan terjadi penurunan tekanan. Hampir semua gas sekarang berada di silinder dingin dan pendinginan berlanjut. Piston dingin, didukung oleh momentum roda gila (pasangan piston lain pada poros yang sama) kompresi bagian gas yang tersisa. Gas pada silinder dingin mencapai volume minimum, dan sekarang akan masuk kedalam silinder panas di mana ia akan dipanaskan sekali lagi, dan memberikan lagi kekuatan pada piston untuk mendorong piston panas.

## 2. Tipe Beta

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.

Mesin Stirling beta memiliki piston daya tunggal yang diatur dalam silinder yang sama pada poros yang sama sebagai displacer piston. Silinder Piston displacer yang cukup longgar hanya berfungsi untuk antar jemput gas panas dari silinder panas ke silinder dingin. Ketika silinder dipanaskan gas mendorong dan memberikan piston kekuatan. Ketika piston terdorong ke dingin (titik bawah)

silinder mendapat momentum dari mesin, dan ditingkatkan dengan roda gila. Tidak seperti jenis alfa, jenis beta tidak akan menyebabkan isolator (pipa pemisah jika dalam bentuk alfa) menjadi panas. Piston tenaga (abu-abu atas) telah mengompresi gas, piston displacer ( abu-abu bawah) telah bergerak sehingga sebagian besar gas panas masuk kedalam silinder panas. Gas yang dipanaskan meningkatkan tekanan dan mendorong Piston tenaga ke batas terjauh (titik bawah). Piston displacer sekarang bergerak ke titik puncak, dan mengirim gas panas ke silinder dingin. Gas didinginkan dan sekarang dikompresi oleh piston tenaga dengan momentum dari roda gila. Langkah Ini membutuhkan energi yang lebih sedikit, karena tekanannya turun ketika didinginkan

### 3. Tipe Gamma

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.

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

Tergantung kepada penggunaannya, mesin Stirling kemudian berkembang menjadi beberapa jenis , antara lain :

1. *Crank-drive Stirling Engine*. Mesin jenis ini pembuatan dan operasinya mudah, tidak menggunakan pelumas (oli) pada *crankcase* nya. Untuk mencegah masuknya oli ke *crankcase*, digunakan jenis bantalan : sealed roller bearings, ball bearings atau bushing dari bahan teflon yang tidak

dilubrikasi. 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. *Free-Cylinder Engine*. Mesin jenis resiprokal (berputar), antara lain untuk pompa .
4. *Duplex Stirling Engine*, untuk mesin freezer penyimpan bahan makanan yang portable.
5. *Free-Piston Alternator Engine*. Digunakan antara lain dalam pengembangan mesin Stirling 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.

### **2.3.5 Kelebihan dan Kekurangan Mesin Stirling**

Ada beberapa kelebihan dan kekurangan digunakannya mesin stirling pada pembangkit ini.(Urieli dan Berchowit, 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

Mesin Stirling dapat bekerja pada sembarang sumber energi panas, termasuk bahan kimia, sinar surya (solar), limbah pertanian (sekam, tempurung kelapa dsb), kayu bakar, berbagai produk minyak bakar (biomassa, biofuel dsb), panas bumi dan nuklir. Kemungkinan implementasi mesin Stirling banyak sekali, namun sebagian besar masuk pada kategori *mesin piston resiprokal*. Perbedaan yang menyolok dengan *mesin pembakaran internal* adalah potensi untuk menggunakan sumber panas terbarukan pada mesin Stirling lebih mudah, suara mesin lebih lembut (tenang), tidak berisik / bising dan biaya perawatannya lebih rendah. *Biaya kapital per unit daya (\$/kW)* dapat ditekan lebih rendah. Dibandingkan dengan mesin pembakaran internal untuk daya yang sama, maka biaya investasi mesin Stirling untuk saat ini umumnya masih lebih besar dan lebih berat, namun perawatannya jauh lebih mudah dan ekonomis. Sehingga secara menyeluruh biaya energinya masih dapat bersaing ketat. Efisiensi panasnya juga berimbang (untuk mesin-mesin yang kecil) berkisar antara 15% – 30%. Dengan basis biaya investasi per unit daya di atas, untuk unit generator dengan kapasitas s/d 100 kW., mesin Stirling masih kompetitif harganya.

Kekurangan :

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

Penggunaan mesin Stirling

Antara lain :

1. Mesin pompa untuk irigasi (pengairan) dengan menggunakan Biomasa
2. Mesin pembangkit listrik (generator), ukuran kecil dan pemukiman (daya besar)
3. Mesin pemecah padi, gandum dsb, memakai sekam sebagai bahan bakarnya
4. Mesin untuk pendingin / freezer portable.

5. Mesin-mesin dengan tenaga surya (matahari) sebagai pembangkit dayanya. Aplikasinya luas, bisa mesin pompa, generator listrik dll

#### **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 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.

## 2.5 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.

### 2.5.1 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 *Paraffin Liquid*

Titik Leleh, °C	46,7
Konduktivitas Termal (Cair), W/m. °C	0,1383
Panas Spesifik (cair), J/Kg.K	2890
Densitas (cair), kg/m <sup>3</sup>	750
Panas Laten, J/Kg	209000
Titik Didih, °C	250

### 2.6 Grafit

Grafit merupakan salah satu jenis bentuk alotropi dari karbon. Yaitu salah satu jenis bentuk atom Grafit dalam fluida penyimpan panas berperan sebagai komposit yaitu suatu material penguat untuk meningkatkan konduktivitas termal serta lamanya waktu p fluida dalam menyimpan panas. Semakin banyak jumlah persen berat grafit pada fluida penyimpan panas maka kinerja dari fluida tersebut untuk menyimpan panas akan meningkat. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Jakob Berg Johansen dkk, grafit ini memiliki banyak karakteristik yang membuatnya ideal sebagai penambah konduktivitas termal, antara lain :

1. Memiliki relatif konduktivitas yang tinggi yaitu 25-500 W/MK
2. Grafit ini non-logam yang berarti bahwa tidak ada korosi galvanik
3. Tidak beracun
4. Harganya murah
5. Tersedia dalam industri besar.