

BAB II

DASAR TEORI

2.1 PERPINDAHAN KALOR KONDUKSI

Dalam peristiwa perpindahan kalor jika dalam suatu sistem terdapat gradien suhu, atau bila dua sistem yang temperaturnya berbeda disinggungkan, maka akan terjadi perpindahan energi. Proses dengan mana transport energi itu berlangsung disebut sebagai perpindahan kalor. Perpindahan energi sebagai kalor adalah selalu dari medium bertemperatur tinggi ke medium bertemperatur rendah, dan perpindahan kalor tersebut akan berhenti ketika kedua medium telah mencapai temperatur yang sama (setimbang). Kalor dapat dipindahkan dalam tiga jenis cara yang berbeda yaitu: konduksi, konveksi dan radiasi.

Konduksi adalah proses dengan mana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur lebih tinggi ke daerah yang bertemperatur lebih rendah di dalam satu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung. Dalam aliran kalor konduksi, perpindahan energi terjadi karena hubungan molekul secara langsung tanpa adanya perpindahan molekul yang cukup besar. Menurut teori kinetik, temperatur elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul-molekul yang membentuk elemen itu. Energi yang dimiliki oleh suatu elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan dan posisi relatif molekul-molekulnya disebut energi dalam. Jadi semakin cepat molekul-molekul bergerak, semakin tinggi temperatur maupun energi dalam elemen zat. Bila molekul-molekul di satu daerah memperoleh energi kinetik rata-rata yang lebih besar daripada yang dimiliki oleh molekul-molekul di suatu daerah yang berdekatan, maka molekul-molekul yang memiliki energi yang lebih besar akan memindahkan sebagian energinya kepada molekul-molekul di daerah yang bertemperatur lebih rendah. Perpindahan energi tersebut dapat berlangsung dengan tumbukan elastik (misalnya dalam fluida) atau dengan pembauran (difusi) elektron-elektron yang bergerak secara lebih cepat dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah (misalnya dalam logam). Jika beda temperatur dipertahankan dengan penambahan dan pembuangan kalor di berbagai titik, maka akan berlangsung aliran kalor yang terus-menerus dari daerah yang lebih panas ke daerah yang lebih dingin.

Laju perpindahan panas dinyatakan dengan hukum Fourier (Jansen, Ted J., 1993)

$$q = -k.A \frac{dT}{dx} \text{ W (Watt)(2.1)}$$

Dengan: k = konduktivitas termal (W/m.K)
A = luas penampang (m²)
dT/dx = gradien temperatur (K/m)

Nilai minus, (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah.

2.2 KALOR (*HEAT*)

Apabila sebuah zat diberikan atau pun melepaskan kalor, maka ada dua hal yang mungkin terjadi, yakni zat tersebut akan mengalami perubahan temperatur atau hal lain yang mungkin terjadi adalah zat tersebut akan mengalami perubahan wujud (fase). Apabila kalor tersebut hanya digunakan untuk perubahan temperatur saja, maka kalor tersebut biasa dikenal dengan kalor sensibel (*sensible heat*), sedangkan jika kalor tersebut digunakan untuk merubah wujud (fase) zat, maka kalor itu biasa disebut dengan kalor laten (*latent heat*).

2.2.1 Kalor Sensibel (*Sensible Heat*)

Kalor sensibel adalah kalor yang digunakan oleh suatu zat untuk merubah temperatur zat tersebut. Jika zat menerima kalor, maka temperaturnya akan naik, sedangkan jika zat tersebut melepaskan kalor, maka zat tersebut akan mengalami penurunan temperatur. Kalor sensibel ini tidak sampai menyebabkan zat mengalami perubahan fase. Secara umum kalor sensibel yang digunakan untuk merubah temperatur suatu zat dirumuskan dengan:

$$Q = m.c.\Delta T(2.2)$$

Dimana: Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (kg)

c = Kalor jenis zat (J/(kg.K))

ΔT = Perubahan temperatur yang terjadi (K)

2.2.2 Kalor Laten (*Latent Heat*)

Kalor laten adalah kalor yang digunakan untuk merubah wujud atau fase suatu zat. Perubahan fase terjadi apabila suatu zat sudah mencapai titik jenuhnya. Pada saat zat mengalami perubahan fase, zat tersebut tidak mengalami perubahan temperatur. Ada dua jenis kalor laten pada suatu zat, yakni kalor laten yang digunakan untuk meleburkan atau membekukan suatu zat, atau biasa dikenal dengan kalor lebur atau pun kalor beku, dan kalor laten yang digunakan untuk menguapkan atau mengembunkan suatu zat, atau biasa dikenal dengan kalor uap atau kalor embun. Besarnya energi yang digunakan untuk merubah fase suatu zat lebih besar daripada energi yang digunakan untuk merubah temperaturnya. Sehingga, pada tekanan yang sama, lebih sulit untuk merubah fase suatu zat daripada merubah temperaturnya saja.

Secara umum, kalor yang digunakan untuk merubah fase suatu zat dirumuskan dengan:

$$Q = m.h_f \dots\dots\dots(2.3)$$

Dimana: Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

m = Massa zat yang mengalami perubahan temperatur (kg)

h_f = Kalor laten (kJ/kg)

Hubungan antara energi kalor dengan laju perpindahan kalor yang terjadi adalah sebagai berikut:

$$Q = q.\Delta t \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana: Q = Besarnya energi kalor sensibel yang bekerja pada suatu zat (J)

q = Laju perpindahan kalor (Watt)

Δt = Waktu yang dibutuhkan untuk memindahkan energi kalor (s)

2.3 REFRIGERASI DAN SIKLUS REFRIGERASI

Refrigerasi adalah efek pendinginan dari proses pengambilan kalor dari sebuah sumber panas dan mentransfernya ke medium lain, sehingga temperatur medium menjadi naik, dengan tujuan untuk menjaga temperatur sumber panas di bawah temperatur sekitarnya.

Sistem refrigerasi adalah sebuah kombinasi dari komponen-komponen, peralatan, dan pemipaan yang disambungkan dalam urutan yang berurutan untuk menghasilkan efek refrigerasi. Sistem refrigerasi yang menghasilkan pendinginan dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama berikut ini:

- Sistem Kompresi Uap

Dalam sistem ini kompresor menekan *refrigerant* ke tekanan dan temperatur yang lebih tinggi dari sebuah uap yang terevaporasi pada tekanan dan temperatur yang rendah. *Refrigerant* yang terkompresi dikondensasikan menjadi wujud cair dengan melepaskan kalor laten pengembunan di kondenser (media kondenser bisa berupa udara ataupun air). *Refrigerant* cair kemudian dihambat menjadi uap bertekanan rendah dan bertemperatur rendah, yang menghasilkan efek refrigerasi selama proses evaporasi. Kompresi uap biasa disebut kompresi mekanik karena refrigerasi menggunakan kompresi mekanik.

- Sistem Absorpsi

Dalam sistem absorpsi, efek refrigerasi dihasilkan dengan menggunakan energi termal input. Setelah *refrigerant* cair menghasilkan refrigerasi selama evaporasi pada tekanan yang sangat rendah, uap *refrigerant* diserap oleh sebuah larutan absorbent. Larutan dipanaskan oleh sebuah pembakaran langsung tungku gas atau dengan panas buangan, dan *refrigerant* diuapkan kembali dan kemudian dikondensasi menjadi wujud cair. *Refrigerant* cair dihambat ke tekanan yang sangat rendah dan siap untuk menghasilkan efek refrigerasi lagi.

- Sistem Gas Ekspansi

Dalam sebuah sistem gas ekspansi, gas dikompresi ke tekanan tinggi oleh kompresor. Kemudian didinginkan oleh permukaan air atau udara atmosfer dan diekspansikan ke tekanan rendah. Karena temperatur gas menurun selama berekspansi, efek refrigerasi dihasilkan.

2.4 REFRIGERANT

Refrigerant adalah fluida kerja primer yang digunakan untuk menghasilkan refrigerasi dalam sebuah sistem refrigerasi. Semua *refrigerant* mengambil kalor pada temperatur dan tekanan yang rendah selama evaporasi dan mengeluarkan kalor pada temperatur dan tekanan yang tinggi selama kondensasi.

Media pendinginan adalah fluida kerja yang didinginkan oleh *refrigerant* selama evaporasi untuk mentransportasikan refrigerasi dari gedung pusat ke peralatan dan terminal-terminal pendinginan yang jauh. Dalam skala besar, sistem pengkondisian udara yang terpusat, lebih ekonomis untuk memompakan media

pendinginan ke lokasi yang jauh dimana pendinginan dibutuhkan. *Chilled water* dan air asin adalah media pendinginan. Mereka biasa disebut sebagai *refrigerant* sekunder untuk membedakan mereka dari refrigerant primer.

Fluida *absorbent* adalah fluida kerja yang digunakan untuk menyerap *refrigerant* yang teruapkan setelah proses evaporasi dalam sebuah sistem refrigerasi absorpsi. Larutan yang mengandung uap yang terserap dipanaskan. *Refrigerant* menguap, dan larutan dikembalikan ke konsentrasi awalnya untuk menyerap uap air lagi.

Sebuah sistem penomoran untuk refrigerant telah dikembangkan untuk hidrokarbon dan halokarbon Berdasarkan ANSI/ASHRAE Standard 34-1992, digit pertama adalah jumlah ikatan karbon-karbon yang tidak jenuh dalam penyusunnya. Digit ini dihilangkan jika jumlahnya adalah nol. Digit kedua adalah jumlah atom karbon dikurangi satu. Digit ini juga dihilangkan jika jumlahnya nol. Digit ketiga menunjukkan jumlah atom hidrogen ditambah satu. Digit terakhir menyatakan jumlah atom fluorin. Sebagai contoh, rumus kimia untuk refrigerant R-123 adalah CHCl_3CF_3 . Dalam penyusunnya:

- Tidak ada ikatan karbon-karbon tak jenuh, digit pertama adalah 0
- Ada dua atom karbon, digit kedua adalah $2 - 1 = 1$
- Ada satu atom hidrogen, digit ketiga adalah $1 + 1 = 2$
- Ada 3 atom fluorin, digit terakhir adalah 3

Untuk membandingkan penipisan ozon relatif pada berbagai refrigerant, sebuah indeks yang disebut *Ozone Depletion Potential* (ODP) diperkenalkan. ODP didefinisikan sebagai rasio laju penipisan ozon dari 1 lb dari setiap halokarbon terhadap 1 lb refrigerant R-11. Untuk R-11, $\text{ODP} = 1$.

Sama dengan ODP, Halocarbon Global Warming Potential (HGWP) adalah sebuah indeks yang digunakan untuk membandingkan efek pemanasan global dari sebuah halokarbon dengan efek dari refrigerant R-11.

2.4.1 Sifat-Sifat yang Diperlukan oleh Refrigerant

Sebuah refrigerant tidak boleh menyebabkan penipisan ozon. Indeks GWP yang rendah sangat diperlukan. Pertimbangan-pertimbangan tambahan dalam memilih refrigerant adalah sebagai berikut:

1. **Keamanan (*safety*)**, meliputi kandungan racun (*toxicity*) dan mampu nyala (*flammability*). ANSI/ASHRAE Standard 34-1992 mengelompokkan kadar racun dalam refrigerant sebagai Kelas A dan Kelas B. Refrigerant Kelas A adalah refrigerant dengan kadar racun rendah. Tidak ada kandungan racun setelah diidentifikasi jika dalam bobot waktu rata-ratanya konsentrasinya kurang dari sama dengan 400 ppm, dimana pekerja bisa terkena 8 jam kerja sehari dan 40 jam kerja seminggu tanpa efek yang merugikan. Refrigerant Kelas B adalah refrigerant yang mempunyai kandungan racun lebih tinggi dan menghasilkan tanda kandungan racun. ANSI/ASHRAE Standard 34-1982 mengelompokkan mampu nyala refrigerant dalam Kelas 1, tidak ada perambatan nyala; Kelas 2, mampu nyala yang rendah; dan Kelas 3, mampu nyala yang tinggi. Pengelompokan keamanan refrigerant didasarkan pada kombinasi kandungan racun dan mampu nyala: A1, A2, A3, B1, B2, dan B3. R-134a dan R-22 berada dalam kelompok A1, kandungan racun dan mampu nyala rendah; R-123 berada dalam kelompok B1, kandungan racun tinggi dan tidak dapat terbakar; dan R-717 (amonia) berada dalam kelompok B2, kandungan racun tinggi dan mampu nyala rendah.
2. **Keefektifan siklus refrigerasi**. Keefektifan yang tinggi adalah sifat yang diharapkan. Energi yang dipakai per ton refrigerasi yang dihasilkan, hp/ton atau kW/ton, adalah sebuah indeks untuk penaksiran ini.
3. **Mampu campur oli (*Oil miscibility*)**. Refrigerant seharusnya dapat bercampur dengan mineral oli pelumas karena pencampuran antara refrigerant dan oli membantu untuk melumasi piston dan katup keluaran, bantalan (*bearing*), dan komponen bergerak lainnya dalam sebuah kompresor. Oli seharusnya bisa dikembalikan dari kondenser dan evaporator untuk pelumasan berkelanjutan. R-22 sebagian mampu bercampur. R-134a sulit bercampur dengan oli mineral; untuk itu pelumas sintetis dari polyolester akan digunakan.
4. **Perpindahan kompresor (*Compressor displacement*)**. Perpindahan kompresor per ton refrigerasi yang dihasilkan, dalam cfm/ton atau dalam satuan yang lain, secara langsung mempengaruhi ukuran dari perpindahan positif kompresor dan kepadatannya. Ammonia R-717 membutuhkan perpindahan kompresor paling rendah dan R-22 berada di urutan kedua (1,91 cfm/ton).
5. **Sifat-sifat yang diharapkan:**

- Tekanan evaporasi, p seharusnya lebih tinggi dari pada tekanan atmosfer. Kemudian gas yang tidak dapat diembunkan tidak boleh bocor ke sistem.
- Tekanan kondensasi yang rendah untuk konstruksi kompresor, kondenser, pemipaan, dan lain-lain yang lebih ringan.
- Konduktivitas termal yang tinggi dan koefisien perpindahan kalor yang tinggi dalam evaporator dan kondenser.
- Konstanta dielektrik seharusnya kompatibel dengan udara ketika *refrigerant* bersentuhan langsung dengan perputaran motor dalam kompresor hermetik.
- *Refrigerant* inert yang tidak bereaksi secara kimia dengan material akan menghindari korosi, erosi, atau kerusakan terhadap komponen sistem. Halokarbon kompatibel dengan semua material penahan kecuali magnesium alloy. Ammonia, dalam kehadiran uap air, adalah korosif terhadap tembaga dan kuningan.
- Kebocoran *refrigerant* bisa dengan mudah dideteksi. Obor halida, elektronik dtektor, dan pendeteksi gelembung biasanya digunakan.

2.5 SIKLUS KOMPRESI UAP SATU TINGKAT IDEAL

2.5.1 Proses Refrigerasi

Proses refrigerasi menunjukkan perubahan sifat-sifat termodinamika *refrigerant* dan transfer energi dan kerja antara *refrigerant* dan sekitarnya. Transfer energi dan kerja dinyatakan dalam British thermal unit per hour (Btu/hr). Unit lainnya yang biasa digunakan adalah ton refrigerant (ton). Satu ton = 12.000 Btu/hr kalor yang dibuang, yakni 1 ton es melebur dalam 24 jam = 12.000 Btu/hr. Satuan yang lain adalah satuan SI, yakni kJ/s atau kW.

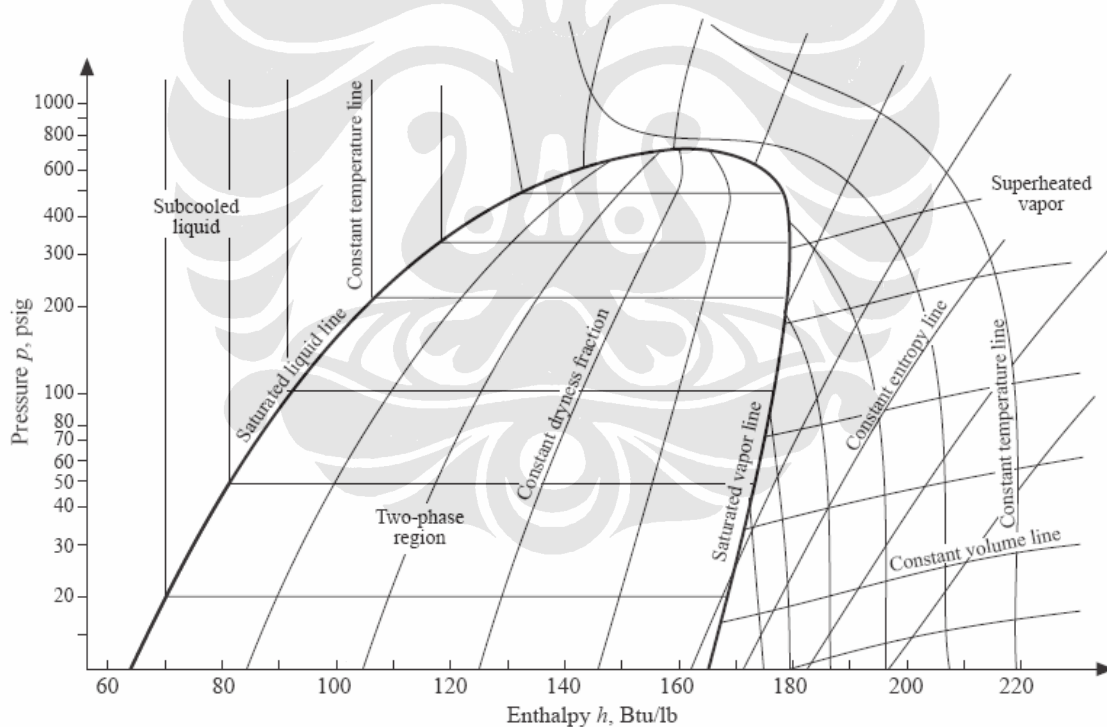
2.5.2 Siklus Refrigerasi

Ketika sebuah *refrigerant* mengalami sederetan proses seperti evaporasi, kompresi, kondensasi, penghambatan, dan ekspansi, yang menyerap panas dari sumber bertemperatur rendah dan membuangnya ke temperatur yang lebih tinggi, maka *refrigerant* tersebut dikatakan telah menjalani sebuah siklus refrigerasi. Jika kondisi akhir sama dengan kondisi awal, disebut siklus tertutup; jika kondisi akhir tidak sama dengan kondisi awalnya, maka disebut siklus terbuka. Sistem refrigerasi

kompresi uap bisa dikelompokkan sebagai siklus satu tingkat, siklus banyak tingkat, siklus campuran, dan siklus tuang (*cascade*).

Diagram tekanan-entalpi (*pressure-enthalpy diagram*) atau *p-h diagram* sering digunakan untuk menghitung transfer energi dan untuk menganalisis kinerja dari sebuah siklus refrigerasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Dalam diagram p-h, tekanan *p* sebagai ordinat, dan entalpi *h* sebagai absis. Garis cairan jenuh dan uap jenuh melingkungi daerah dua fase dimana uap dan cair berdampingan. Daerah dua fase memisahkan daerah cairan bawah dingin (*subcooling*) dan daerah uap panas lanjut (*superheated*). Garis temperatur konstan hampir vertikal di daerah bawah dingin, horizontal dalam daerah dua fase, dan melengkung ke bawah dengan curam di daerah panas lanjut.

Dalam daerah dua fase, diperlihatkan tekanan jenuh menentukan temperatur jenuh. Garis entropi konstan dibelokkan ke atas ke sisi kanan dalam daerah panas lanjut. Setiap jenis *refrigerant* mempunyai diagram p-h sendiri-sendiri.



Gambar 2.1 Diagram tekanan-entalpi [2]

2.5.3 Proses Refrigerasi pada Sebuah Siklus Satu Tingkat Ideal

Sebuah siklus ideal mempunyai kompresi isentropis, dan mempunyai rugi-rugi tekanan dalam saluran pipa, katup, dan komponen lainnya diabaikan. Satu tingkat berarti hanya ada satu tingkat kompresi.

Ada empat proses refrigerasi dalam siklus kompresi uap satu tingkat ideal, seperti ditunjukkan pada gambar:

1. Proses evaporasi isothermal 4-1

Refrigerant berevaporasi secara penuh dalam evaporator dan menghasilkan efek refrigerasi q_{rf} dalam Btu/lb:

$$q_{rf} = h_1 - h_4 \dots\dots\dots(2.5)$$

dimana h_1 dan h_4 = entalpi *refrigerant* pada titik 1 dan titik 4 dalam Btu/lb

2. Proses kompresi isentropis 1-2

Uap *refrigerant* diambil oleh kompresor dan dikompresi secara isentropis dari titik 1 ke 2. Kerja input pada kompresor W_{in} , dalam Btu/lb, adalah:

$$W_{in} = h_2 - h_1 \dots\dots\dots(2.6)$$

dimana h_1 dan h_2 = entalpi *refrigerant* pada titik 1 dan titik 2 dalam Btu/lb

Semakin besar perbedaan pada temperatur/tekanan antara tekanan pengembunan p_{con} dan tekanan penguapan p_{ev} , akan semakin tinggi kerja input pada kompresor.

3. Proses kondensasi isothermal 2-3

Gas panas *refrigerant* yang dikeluarkan dari kompresor dikondensasi dalam kondenser menjadi bentuk cair, dan kalor laten kondensasi dibuang ke air atau udara lingkungan dalam kondenser. Kalor yang dibuang selama kondensasi, q_{2-3} , dalam Btu/lb, adalah

$$-q_{2-3} = h_2 - h_3 \dots\dots\dots(2.7)$$

dimana h_3 = entalpi *refrigerant* pada titik 3 dalam Btu/lb

4. Proses penghambatan 3-4

Refrigerant cair mengalir melalui alat penghambat (contohnya: sebuah katup ekspansi, pipa kapiler, atau orifis) dan tekanannya dikurangi menjadi tekanan evaporasi. Sebagian cairan berubah menjadi uap dan memasuki evaporator. Proses ini adalah proses *ireversibel* dalam siklus ideal, biasanya digambarkan dengan garis putus-putus. Untuk proses penghambatan, diasumsikan bahwa kalor yang diperoleh dari sekitarnya diabaikan:

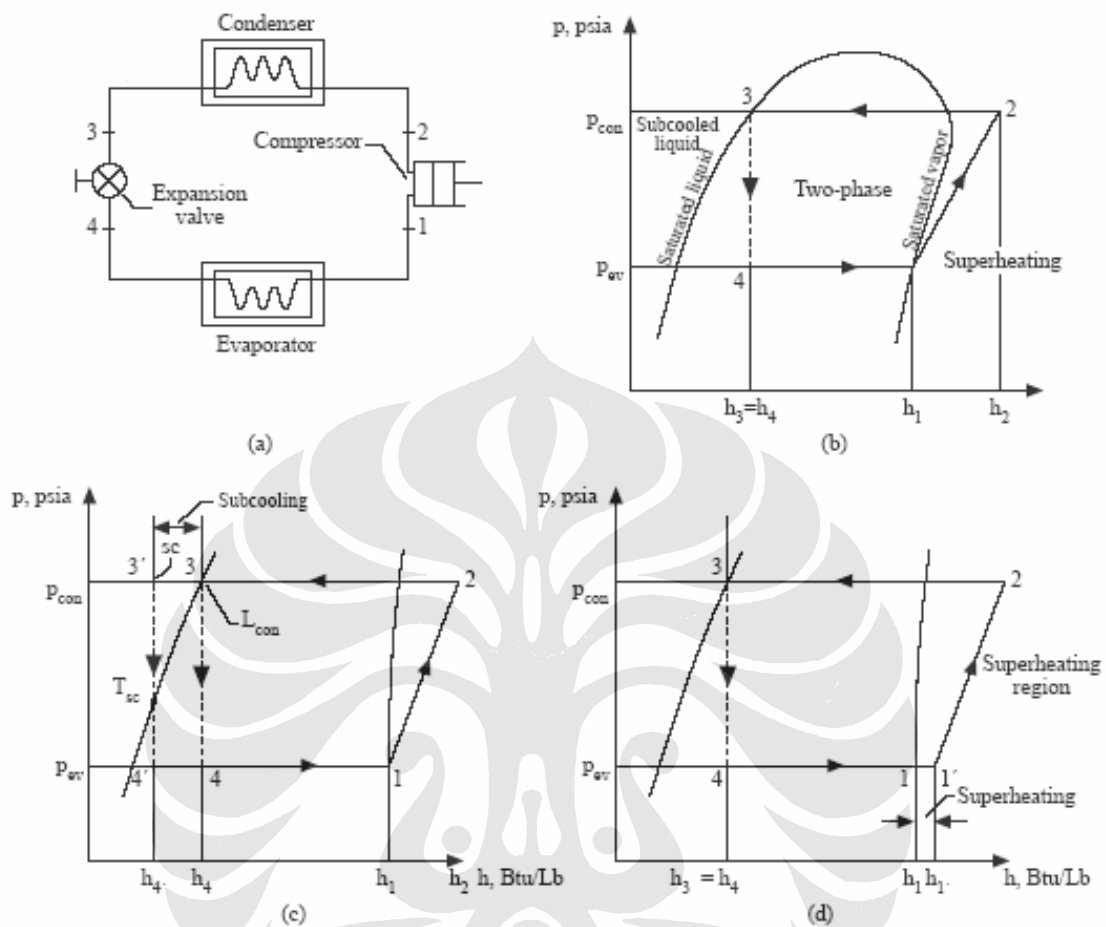
$$h_3 = h_4 \dots\dots\dots(2.8)$$

Laju aliran massa *refrigerant* \dot{m}_r , dalam lb/min, adalah:

$$\dot{m}_r = \frac{q_{rc}}{60q_{rf}} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana q_{rc} = kapasitas refrigerasi dalam sistem, dalam Btu/hr

Siklus refrigerasi kompresi uap satu tingkat ideal dalam diagram p-h dibagi:



Gambar 2.2 Siklus refrigerasi kompresi uap satu tingkat ideal: (a) skema diagram, (b) diagram p-h, (c) pendinginan bawah (subcooling), (d) pemanasan lanjut (superheating) ^[2]

2.5.4 Koefisien Kinerja (*Coefficient of Performance*) Siklus Refrigerasi

Koefisien Kinerja atau *Coefficient of Performance* (COP) adalah bilangan tidak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan kinerja dari sebuah siklus termodinamik atau sistem termal. Besarnya COP bisa lebih dari 1.

- Jika sebuah refrigerator digunakan untuk menghasilkan sebuah efek refrigerasi, COP_{ref} adalah:

$$COP_{ref} = q_{rf} / W_{in} \dots\dots\dots(2.10)$$

- Jika sebuah pompa kalor digunakan untuk menghasilkan efek pemanasan, kinerjanya dinyatakan dengan COP_{hp} , yakni:

$$COP_{hp} = q_{2-3} / W_{in} \dots\dots\dots(2.11)$$

- Untuk sebuah sistem heat recovery ketika efek refrigerasi dan efek pemanasan dihasilkan, COP_{hr} dinyatakan oleh perbandingan jumlah nilai absolut q_{rf} dan q_{2-3} terhadap kerja input, atau:

$$COP_{hr} = \frac{(|q_{rf}| + |q_{2-3}|)}{W_{in}} \dots\dots\dots(2.12)$$

2.5.5 Bawah Dingin (*Subcooling*) dan Panas Lanjut (*Superheating*)

Refrigerant cair yang diembunkan biasanya didinginkan ke temperatur yang lebih rendah dari temperatur jenuhnya pada tekanan kondensasi, seperti ditunjukkan pada gambar 2.2(c). *Subcooling* meningkatkan efek refrigerasi menjadi $q_{rf,sc}$ seperti ditunjukkan pada gambar 2.2(c):

$$q_{rf,sc} = (h_{4'} - h_1) > (h_4 - h_1) \dots\dots\dots(2.13)$$

Entalpi *refrigerant* cair yang mengalami subcooling h_{sc} hampir sama dengan entalpi *refrigerant* cair jenuh pada temperatur bawah dingin (subcooled) $h_{s,sc}$:

$$h_{sc} = h_{3'} = h_{4'} = h_{1.con} - c_{pr} (T_{con} - T_{sc}) \approx h_{s,sc} \dots\dots\dots(2.14)$$

dimana: $h_{3'}$, $h_{4'}$ = entalpi *refrigerant* cair masing-masing di titik 3' dan 4' dalam Btu/lb

$h_{1.con}$ = entalpi cairan jenuh pada temperatur kondensasi, dalam Btu/lb

c_{pr} = kalor spesifik *refrigerant* cair pada tekanan konstan, dalam Btu/lb.°F

T_{con} = Temperatur kondensasi atau tekanan jenuh *refrigerant* cair pada tekanan kondensasi, dalam °F

T_{sc} = Temperatur *refrigerant* cair yang didinginkan lanjut (*subcooled*), dalam °F

Tujuan pemanasan lanjut (*superheating*) adalah untuk menjaga *refrigerant* cair agar tidak masuk ke dalam kompresor dan menyebabkan kerusakan. Pemanasan lanjut ditunjukkan seperti pada gambar 2.2(d). Derajat pemanasan lanjut sebagian besar bergantung pada jenis *refrigerant*, konstruksi saluran hisap, dan jenis kompresor. Titik *refrigerant* uap setelah pemanasan lanjut pada sebuah sistem yang ideal harus pada tekanan evaporator dengan sebuah derajat panas lanjut spesifik dan bisa diplot dalam diagram *p-h* untuk berbagai *refrigerant*.

2.6 SOLAR ENERGY

Sumber utama dari energi *solar* adalah matahari. Matahari memancarkan sinarnya berupa energi gelombang elektromagnetik yang merambat di luar angkasa. Kalor sampai ke bumi berpindah secara radiasi. Panjang gelombang elektromagnetiknya bervariasi dari 0,1 μm (x-rays) sampai 100 m (radio waves). Kandungan energi matahari diluar angkasa (di luar atmosfer bumi) rata-rata 1.367 W/m^2 , energi tersebut dapat menyalakan peralatan elektronik dalam satu keluarga sederhana. Energi tersebut diserap sebagian ke atmosfer sehingga tersisa kurang lebih 950 W/m^2 . Energi yang dapat dimanfaatkan manusia tergantung pada:

- Ketinggian matahari dari permukaan bumi
- Cuaca
- Sudut matahari terhadap dataran
- Periode waktu (bulanan atau tahunan)
- Lokasi suatu tempat
- Teknologi yang digunakan
- Penggunaannya

Penerapan energi matahari yang paling banyak digunakan adalah untuk pemanasan ruangan atau pemanasan air. Dalam teknologi produksi listrik digunakan *photovoltaic* dan *thermal-electric* untuk menghasilkan listrik atau energi yang disimpan dibaterai.

2.7 FOTOVOLTAIK

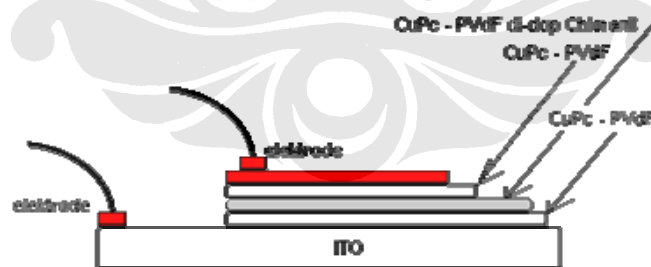
Sel surya atau sel fotovoltaik, adalah sebuah alat semikonduktor yang terdiri dari sebuah wilayah-besar dioda p-n *junction*, di mana, dalam hadirnya cahaya matahari mampu menciptakan energi listrik yang berguna. Perubahan ini disebut efek fotovoltaik. Bidang riset berhubungan dengan sel surya dikenal sebagai *photovoltaics*.

Sel surya ini untuk pertama kali ditemukan oleh seorang ahli bernama Edmund Becquerel, yang dalam penemuannya menemukan efek fotovoltaic. Kemudian alat ini mengalami perkembangan yang cukup berarti. Pada awal mula sel surya dibuat dengan *selenium wafers*. Sekarang menggunakan berbagai macam bahan seperti material *piezoeletric*, yang mengalami deformasi ketika mengalami suatu beban, atau perubahan temperatur. Kemudian ilmuwan Albert Einstein yang

mendapat hadiah Nobel atas teori tentang efek *photoelectric*. Di bidang antariksa, negara AS berhasil meluncurkan pesawat luar angkasa *Nimbus* dengan sel surya sebagai sumber keperluan di dalam pesawat tersebut. Jepang menggunakan sel surya untuk pembangunan rumah kaca. Dan perkembangan terakhir sel surya adalah dipakai sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya, yang dibuat pertama kali di California tahun 1982.

Sel surya memiliki banyak aplikasi. Mereka terutama cocok untuk digunakan bila tenaga listrik dari grid tidak tersedia, seperti di wilayah terpencil, satelit pengorbit, kalkulator genggam, pompa air, dll. Sel surya (dalam bentuk modul atau panel surya) dapat dipasang di atap gedung di mana mereka berhubungan dengan inverter ke grid listrik dalam sebuah pengaturan net metering.

Struktur *solar cell* telah dibuat menggunakan teknik pemendapan film *spin-coating* dari bahan Kuprum phthalocyanine (CuPc) dicampurkan dengan bahan *polyvinylidene* (PVdF) kemudian di-dop dengan bahan 8% bahan Chloranil dengan ketebalan lapisan 4 mm yang diendapkan di atas substrat dari lapisan *Indium Tin Oxide* (ITO) seperti terlihat pada Gambar 2.3. Lapisan elektrode dibuat dari bahan *Indium*. Meskipun efisiensi yang diperoleh masih rendah (2%) jika dibandingkan dengan *solar cell* yang sudah ada sekarang yang dibuat dari bahan silikon, namun hasil tersebut telah menunjukkan prospek daripada bidang elektronika molekul. Sejalan dengan perkembangan eksplorasi bahan baru maka efisiensi tersebut dimungkinkan akan selalu meningkat.



Gambar 2.3 Desain *solar cell* menggunakan bahan CuPc - PVdF yang di-dop dengan bahan Chloranil^[3]

Listrik tenaga matahari dibangkitkan oleh komponen yang disebut *solar cell* yang besarnya sekitar 10 ~ 15 cm persegi. Komponen ini mengkonversikan energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik. *Solar cell* merupakan komponen vital yang umumnya terbuat dari bahan semikonduktor.

Multicrystalline dan monocrystalline silikon menghasilkan efisiensi yang relatif lebih tinggi daripada amorphous silikon. Sedangkan amorphous silikon dipakai

karena biaya yang relatif lebih rendah. Selain dari bahan nonorganik diatas dipakai pula molekul-molekul organik walaupun masih dalam tahap penelitian.

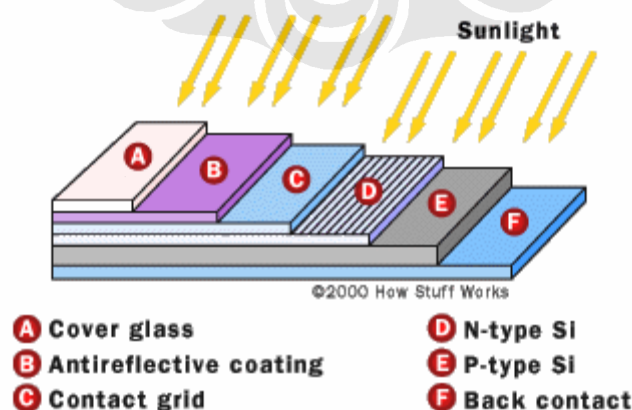
Salah satu yang diukur dalam kerja *solar cell* adalah efisiensi. Yaitu persentase perubahan energi cahaya matahari menjadi energi listrik.

Tabel 2. 1 Jenis material sel surya ^[4]

Solar Module	Efficiency	Lifetime	Price	Power / Area
Monocrystalline-	10 - 13 %	25 years 90 % rated power 30 years 80 % rated power typical	high	high
Polycrystalline-	9 - 13 %	10 years 90 % rated power 25 years 80 % rated power typical	moderate	moderate
Amorphous-	6 - 8 %	10 years	low	low

Photovoltaic (PV) *cells* terbuat dari material khusus yang disebut semikonduktor seperti silikon. Pada dasarnya ketika cahaya mengenai *cells*, sebagian dari cahaya tersebut diserap oleh bahan semikonduktor. Energi yang diserap tersebut membuat elektron menjadi merenggang dan menyebabkan elektron lebih bebas bergerak. PV *cells* juga mempunyai satu atau lebih medan listrik yang memaksa elektron untuk bergerak dengan arah tertentu. Aliran elektron ini merupakan arus listrik, dan dengan menempatkan menghubungkan dengan logam di atas dan di bawah PV *cells*, maka kita bisa mengalirkan listrik ke luar.

2.7.1 Silikon di Dalam Solar Cell



Gambar 2.4 Struktur dasar dari Sel PV Silikon Generik ^[3]

Pada *solar cell* terdapat ketidakmurnian silikon karena ada atom lain yang berikatan dengan atom pada silikon. Ketidakmurnian ini menyebabkan orbit terluar

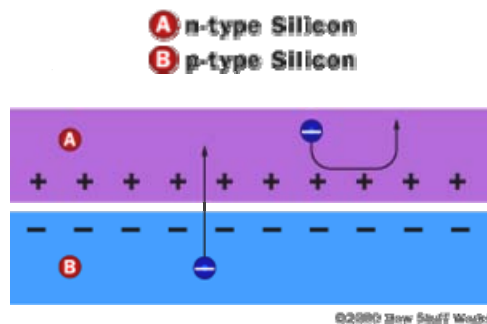
pada atom silikon terdapat phosphorous. Phosphorous ini memiliki 5 elektron pada orbit terluar. Atom tersebut berikatan satu sama lain dengan atom tetangga, namun menyebabkan satu elektron lagi tidak memiliki pasangan Hal ini menyebabkan masih ada proton positif untuk menjaga atom tersebut pada posisinya.

Ketika energi ditambahkan pada silikon murni menyebabkan beberapa elektron terbebas dari ikatan dan meninggalkan atom sehingga terjadilah hole. Elektron ini kemudian berpencar secara acak di sekitar *crystalline lattice* dan mencari hole lain untuk ditempati. Elektron ini disebut *free carrier* dan bisa membawa arus listrik. Proses menambahkan *impurities* disebut doping, ketika men-doping phosphorous menghasilkan silikon jenis N. Pada *solar cell* terdapat juga silikon tipe P yang di doping oleh atom boron. Silikon tipe P mempunyai hole bebas. Hole kekurangan elektron sehingga membawa *opposite charge* (positif).

2.7.2 Silikon Tipe-N dan Tipe-P

Setiap PV cell harus memiliki medan listrik agar cell dapat bekerja. Medan listrik didapatkan ketika silikon tipe N dan tipe P dihubungkan satu sama lain. Elektron bebas pada sisi N akan mencari hole pada tipe P dan akan terjadi aliran elektron untuk mengisi hole tersebut.

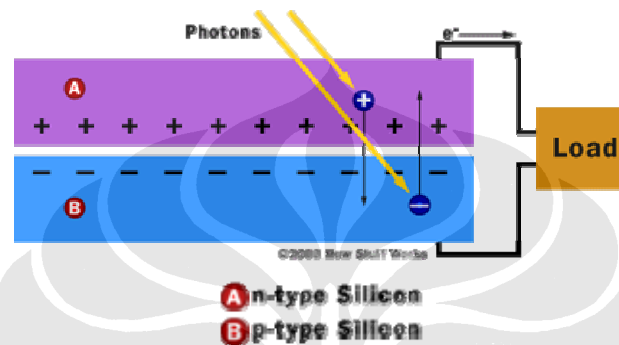
Sebelum terjadi aliran ini, elektron yang berlebih diimbangi dengan kelebihan proton pada phosphorous, hole diimbangi dengan kehilangan proton pada boron. Ketika hole dan elektron bersatu pada *junction* antara tipe N dan tipe P tidak semua elektron bebas mengisi hole. Pada *junction*, mereka akan bercampur dan akan membentuk pembatas (*barrier*) akan menyebabkan elektron pada tipe N lebih sulit untuk menyeberang ke hole pada tipe P. Ketika itu terjadilah keseimbangan dan terbentuk medan listrik yang terpisah.



Gambar 2.5 Silikon tipe-n dan tipe-p^[3]

Medan listrik ini berfungsi seperti dioda, terjadi aliran elektron dari sisi P ke sisi N tapi tidak bisa terjadi aliran dari sisi N menuju sisi P.

Ketika cahaya dalam bentuk photon mengenai *solar cell*, energinya akan membebaskan pasangan-pasangan elektron-hole. Setiap photon dengan energi yang cukup akan membebaskan satu elektron dan menyebabkan hole bebas juga. Ketika hal ini terjadi di dekat medan listrik, medan akan mengirim elektron ke sisi N dan hole ke sisi P. Jika kita mempunyai rangkaian listrik di luar maka elektron-electron tadi akan mengalir melalui rangkaian ke sisi asal (sisi P) untuk mempersatukan dengan hole. Aliran elektron menyebabkan arus listrik dan medan listrik pada cell menyebabkan tegangan.



Gambar 2.6 Aliran Elektron Pada Sel Surya^[3]

Tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu *solar cell* sangat kecil maka beberapa *solar cell* harus digabungkan sehingga terbentuklah satuan komponen yang disebut *module*. Produk yang dikeluarkan oleh industri-industri *solar cell* adalah dalam bentuk *module* ini. Pada aplikasinya, karena tenaga listrik yang dihasilkan oleh satu *module* masih cukup kecil (rata-rata maksimum tenaga listrik yang dihasilkan 130 W) maka dalam pemanfaatannya beberapa *module* digabungkan dan terbentuklah apa yang disebut *array*. Sebagai contoh untuk menghasilkan listrik sebesar 3 kW dibutuhkan *array* seluas kira-kira 20 ~ 30 meter persegi.

2.7.3 Battery Charge Regulator (BCR)

Battery Charge Regulator (BCR) pada dasarnya berfungsi untuk mengatur pengisian (*charging*) dan pemakaian (*discharging*) listrik dari dan ke batere, agar tidak *overload*. Pada saat batere terisi penuh, alat pengatur akan memutus hubungan antara modul fotovoltaik dan batere, sedangkan pada saat batere kosong, alat pengatur akan memutus hubungan antara batere dengan beban.

Battery Charge Regulator (BCR) memiliki karakteristik yaitu batere sel timah hitam yang mampu membatasi pembentukan sulfat berlebih melalui:

- Penurunan arus pengisian dari modul photovoltaik, yaitu membatasi tegangan agar tidak melampaui tegangan batas atas.
- Membatasi DOD dengan pemutus arus otomatis ke rangkaian beban, ketika tegangan batere turun di bawah tegangan batas bawah.

Kedua pembatasan di atas adalah untuk memperpanjang usia batere.

2.7.4 Batere

Batere berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh modul photovoltaik pada siang hari untuk digunakan sesuai dengan kebutuhan. Pabrik pembuat batere menentukan spesifikasi batere dengan memberikan data tegangan (Volt) dan kapasitas rate (Ah).

2.7.5 Peralatan Beban

Segala jenis beban yang membutuhkan arus listrik, pada dasarnya dapat digunakan dengan modul photovoltaik. Mulai dari lampu, alat-alat elektronik (radio, televisi, komputer dan lain-lain). Baik dengan sistem tegangan DC ataupun AC.

2.7.6 Kapasitas Fotovoltaik

Untuk mengetahui jumlah fotovoltaik yang dibutuhkan maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menentukan beban yang dibutuhkan
2. Tentukan PV panel yang akan digunakan
3. Menghitung energi yang dihasilkan

$$E_1 \text{ (Wh/hari)} = P.S.H \times V_{dc} \times I_{pv} \dots\dots\dots(2.15)$$

Dengan:

P.S.H = Peak *Solar* hour (Jam)

V_{dc} = Tegangan DC (Volt)

4. Menghitung modul yang dibutuhkan secara seri

$$N_s = \frac{V_{dc}}{V_m} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dengan:

V_{dc} = tegangan DC (Volt)

V_m = tegangan operasi dari panel PV (Volt)

5. Menghitung modul yang dibutuhkan secara parallel

$$N_p = (SF) \frac{I_{pv}}{I_m} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan:

SF = Safety factor atau Sizing Factor

I_m = Arus PV panel

$$i_{pv} = \frac{24(\text{jam / hari}) \times i_L(A)}{PSH(\text{jam / hari})} (A) \dots\dots\dots(2.18)$$

6. Menghitung total panel yang dibutuhkan

$$N = N_p \times N_s \dots\dots\dots(2.19)$$

Jadi, untuk mengetahui efisiensi PV digunakan rumus:

$$\eta = \frac{P_c}{A_c \times I_t} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dengan:

P_c = Daya (Watt)

A_c = Luas Area (m^2)

I_t = Solar Intensity

2.7.7 Kapasitas Batere

Kapasitas Batere yang diperlukan dapat dihitung dengan menggunakan rumus:

$$C \text{ (Ah pada 12 Volt)} = (\text{Kebutuhan Energi Beban} \times \text{jumlah hari untuk menyimpan energi}) / (\text{D.O.D} \times 12 \text{ Volt}) \dots\dots\dots(2.21)$$

Catatan:

- Jumlah hari untuk menyimpan energi adalah jumlah hari dimana tidak ada cahaya matahari yang disebut sebagai ”*Autonomous Days*”.
 - Dalam pengertian sehari-hari yang dimaksud dengan tidak adanya cahaya matahari, yaitu kejadian dimana kondisi cuaca saat itu adalah sangat mendung sekali (berawan tebal), sehingga sangat sedikit atau hampir tidak ada energi yang masuk kedalam batere.
 - *Autonomous Days* ini, untuk sistem PLTS biasanya diambil antara 3 sampai 5 hari.
 - D.O.D adalah singkatan dari ”*Depth Of Discharge*”
- Dalam penentuan kapasitas batere umumnya diambil D.O.D = 0,8 yaitu yang merupakan kapasitas minimum yang boleh dikeluarkan (*di-discharge*).

Untuk sistem PLTS dengan 1 modul (SHS) umumnya digunakan batere dengan kapasitas 70 Ah.

