

BAB II DASAR TEORI

2.1 Refrigerasi dan Pengkondisian Udara

Air Conditioning (AC) atau alat pengkondisi udara merupakan modifikasi pengembangan dari teknologi mesin pendingin. Alat ini dipakai bertujuan untuk memberikan udara yang sejuk dan menyediakan uap air yang dibutuhkan bagi tubuh. Untuk negara beriklim tropis yang terdiri dari musim hujan dan musim panas, pada saat musim panas suhu ruangan tinggi sehingga penghuni tidak nyaman.

Di lingkungan tempat kerja, AC juga dimanfaatkan sebagai salah satu cara dalam upaya peningkatan produktivitas kerja. Karena dalam beberapa hal manusia membutuhkan lingkungan udara yang nyaman untuk dapat bekerja secara optimal. Tingkat kenyamanan suatu ruang juga ditentukan oleh temperatur, kelembapan, sirkulasi dan tingkat kebersihan udara.

Untuk dapat menghasilkan udara dengan kondisi yang diinginkan, maka peralatan yang dipasang harus mempunyai kapasitas yang sesuai dengan beban pendinginan yang dimiliki ruangan tersebut. Untuk itu diperlukan survey dan menentukan besarnya beban pendinginan.

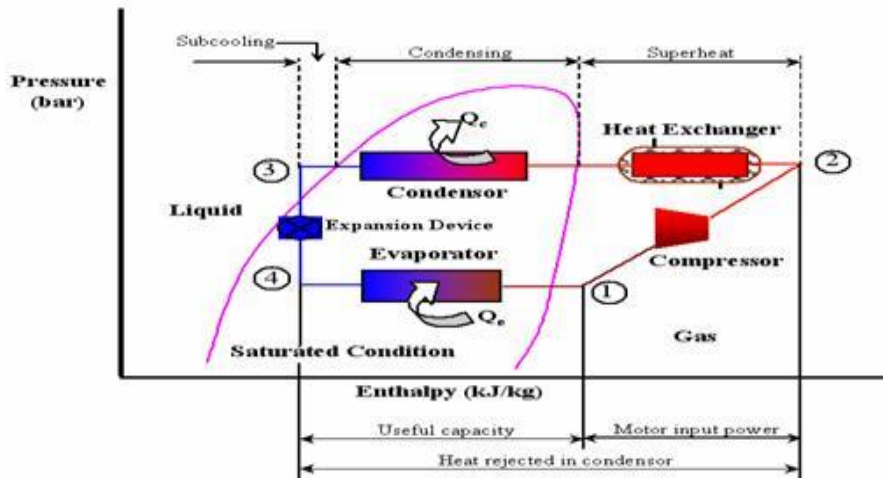
Secara garis besar beban pendinginan terbagi atas dua kelompok, yaitu beban pendinginan sensibel dan beban pendinginan laten. Beban pendinginan sensibel adalah beban panas yang dipengaruhi oleh perbedaan suhu, seperti beban panas yang lewat konstruksi bangunan, peralatan elektronik, lampu, dll. Sedangkan beban pendinginan laten adalah beban yang dipengaruhi oleh adanya perbedaan kelembapan udara.

Di dalam ruang Pengajaran Umum, untuk merencanakan penggunaan Air Conditioning (AC) perubahan pembebanan terjadi pada peralatan yang menghasilkan kalor seperti: lampu, komputer. Selain itu faktor manusia dan kecepatan udara yang masuk ke dalam ruangan juga mempengaruhi perubahan pembebanan, yang nilai bebannya dapat berubah-ubah baik secara acak maupun teratur.

2.1.1 Pengertian *Air Conditioning Water Heater*

ACWH adalah sistem yang memanfaatkan panas buang dari sisi sistem pendinginan untuk memanaskan air. Sebagian dari refrigerant yang sudah dikompresi oleh kompresor digunakan untuk memanaskan air dengan bantuan alat

penukar kalor. Penukar kalor inilah yang sangat menentukan kinerja dari mesin pendingin ini. Dibutuhkan penukar kalor yang dapat memindahkan kalor semaksimal mungkin dari refrigerant tanpa menyebabkan berkurangnya kinerja mesin pendingin.



Gambar 2.1 Siklus Mesin Penkondisian Udara Pemanas Air

Prinsip kerja ACWH adalah;

- Proses 1 - 2:
Uap Refrigerant dari evaporator dihisap kompresor kemudian ditekan sehingga refrigerant bertekanan tinggi dan temperatur refrigerant tinggi.
- Proses 2 - 2' :
Panas refrigerant ditransfer kepada air di dalam penukar kalor tanpa mengalami kenaikan temperatur sedangkan refrigerant mengalami penurunan temperatur dan sebagian telah berubah fasa dari gas menjadi cair.
- Proses 2 - 3
Refrigerant didinginkan pada kondensor seperti pada siklus pendinginan biasa.
- Proses 3 - 4 :
Refrigerant keluaran kondensor dan penukar kalor diekspansikan. Cairan refrigerant dengan tekanan dan temperature tinggi diekspansikan sehingga mengalami penurunan tekanan dan temperature.

- Proses 4 – 1 :

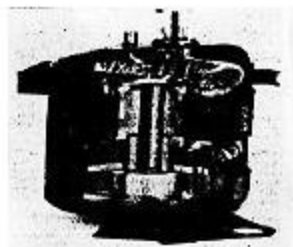
Refrigerant di evaporator dalam keadaan temperatur rendah sehingga dapat menyerap kalor ruangan. Cairan refrigerant menguap karena menerima kalor sehingga terjadi penguapan. Selama proses penguapan di dalam pipa terdapat campuran refrigerant dari fasa cair menjadi uap atau gas. Proses ini berlangsung pada tekanan tetap sampai mencapai derajat superheat.

Secara teoritis dengan penambahan penukar panas dapat meningkatkan jumlah kalor yang dapat dibuang yang berarti dapat menambah beban pendinginan (*cooling load*) yang dapat dipindahkan dengan kerja kompresor yang sama.

2.2. Komponen Utama Sistem Pendingin

2.2.1 Kompresor

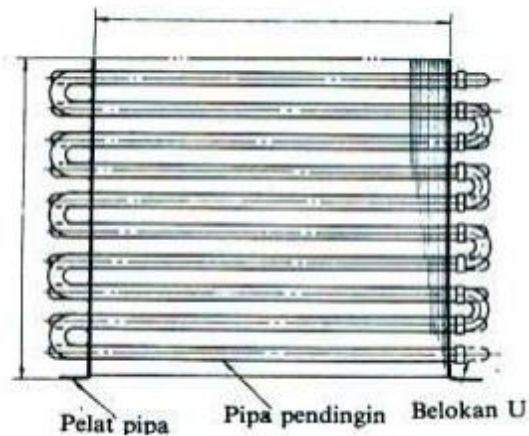
Kompresor adalah suatu alat pada mesin pendingin. Daya hisapnya yang menghisap dan memompa gas digerakkan oleh electromotor. Sehingga menaikkan tekanan yang mengakibatkan adanya kompresi yang bertujuan untuk memudahkan cairan kembali dari refrigerant. Pada waktu uap refrigerant dihisap masuk ke kompresor berlangsung maka temperaturnya akan naik. Jumlah refrigerant yang bersirkulasi didalam daur refrigerant tergantung pada jumlah uap yang dihisap masuk kedalam kompresor.



Gbr 2.6 kompresor hermatik (heizo sato 1986 : 133)

2.2.2 Kondensor

Kondensor adalah suatu jaringan pipa yang berfungsi sebagai pengembunan udara yang dipompakan dari kompresor akan mengalami penukaran, sehingga mengalir ke pipa kondensor. Selanjutnya udara yang berada dalam pipa kondensor akan mengalami pengembunan dan menjadi cair jenuh. Dari sini, udara yang sudah mengembun dan menjadi zat cair jenuh akan mengalir menuju pipa evaporator melalui katup ekspansi.



Gbr 2.7 Kondensor pendingin udara jenis koil bersirip (heizo saito 1986 : 153)

2.2.3 Alat Ekspansi

Pipa kapiler dibuat dari tembaga dengan diameter lubang dalam yang sangat kecil, panjang dan lubang pipa kapiler dapat mengontrol jumlah bahan pendingin yang masuk evaporator. Karena tekanan dan temperature cairan dari kondensor terlalu tinggi untuk terjadinya penguapan dalam kondisi ruangan, maka digunakan pipa kapiler (*liquid control device*) yang bekerja sebagai suatu tahanan fluida (*bahan pendingin cair*).

Dengan adanya tahanan tersebut, tekanan fluida akan turun dan sebagian kecil cairan pendingin menguap (*flash gas*). Penguapan ini akan menyerap kalor dari cairan pendingin, sehingga temperature cairan berkurang sampai temperature jenuh pada tekanan yang berkurang tersebut.

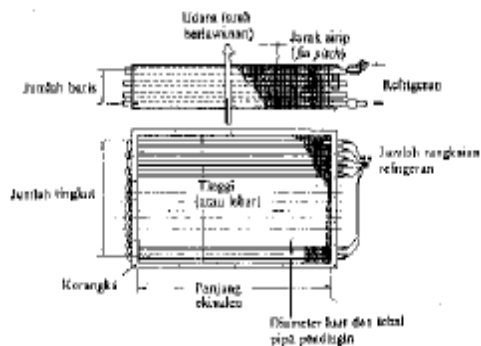
Pipa kapiler (*capillary tube*) berguna untuk :

1. Menurunkan tekanan bahan pendingin cair yang mengalir didalamnya.
2. Mengatur jumlah tekanan bahan pendingin cair yang mengalir melaluinya.
3. Membangkitkan tekanan bahan pendingin di kondensor.

Alat Ekspansi yang sering digunakan adalah katup ekspansi termostatik dan pipa kapiler. Katup Ekspansi termostatik Merupakan katup ekspansi berkendali panas lanjut yang berfungsi agar refrigerant yang masuk evaporator sesuai dengan beban pendingin yang harus dilayani.

2.2.4 Evaporator

Evaporator adalah suatu jaringan atau bentuk pipa yang dikonstruksikan sedemikian rupa berfungsi sebagai alat penguapan. Pipa evaporator ada yang terbuat dari bahan tembaga, besi, aluminium, atau dari kuningan. Namun kebanyakan terbuat dari aluminium dan besi.



Gbr 2.8 Evaporator pendingin udara jenis koil bersirip (heizo saito 1986 : 153)

Cara kerja evaporator adalah menguapkan gas yang masuk dari pipa kondensor. Gas refrigerant dari kompresor masih dalam temperature yang sangat tinggi, artinya kalorinya(panasnya) dinaikkan. Setelah itu karena dorongan dari kompresor, ia mengalir masuk masuk pipa-pipa kondensor. Dalam pipa kondensor ini, gas mengalami perubahan menjadi dingin, selanjutnya mengalir terus menuju pipa kapiler, dari pipa kapiler merambat menuju ke pipa evaporator.

2.2.5 Refrigerant

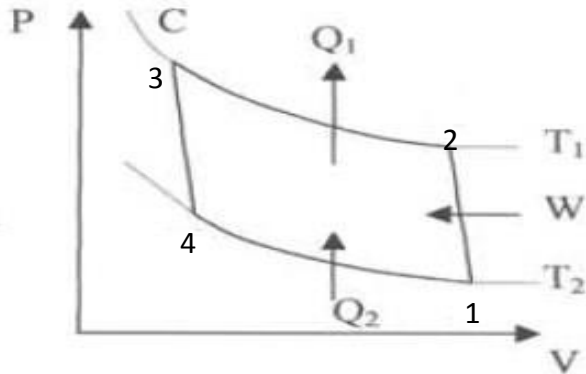
Refrigerant adalah media perpindahan panas, yang menyerap panas atau kalor dengan penguapan (evaporator) pada temperature rendah dan memberikan kalor dengan pengembunan (kondensor) pada temperature dan tekanan tinggi.

Refrigerant dalam perdagangan telah diklasifikasi oleh ASRE (American Society of Refrigerating Engineers). Standart dari ASRE membagi refrigerant dalam beberapa kelompok penting yaitu senyawa Halokarbon, Anorganik, Hidrokarbon, dan Aezotop.

2.3 Termodinamika Sistem Refrigerasi

2.3.1 Siklus Refrigerasi Carnot

Siklus refrigerasi carnot merupakan kebalikan dari mesin carnot. Mesin carnot menerima energi kalor dari temperatur tinggi, energi kemudian diubah menjadi suatu kerja dan sisa energi tersebut dibuang ke sumber panas pada temperatur rendah. Sedangkan siklus refrigerasi carnot menerima energi pada temperatur rendah dan mengeluarkan energi pada temperatur tinggi. Oleh sebab itu pada siklus pendingin diperlukan penambahan kerja dari luar. Dan untuk Daur Refrigerasi carnot ditunjukkan pada Gambar 2.3.

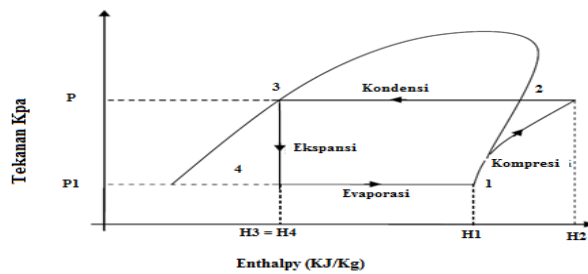


Gambar 2.5. Daur refrigerasi carnot

Proses-proses yang membentuk daur refrigerasi carnot :

- Proses kompresi adiabatik (1-2)
- Proses pelepasan kalor isothermal (2-3)
- Proses ekspansi adiabatik (3-4)
- Proses penyerapan kalor isothermal (4-1)

Tujuan utama dari daur ini adalah penyerapan kalor dari sumber bersuhu rendah pada proses 4-1 yaitu penyerapan kalor isothermal.



2.3.2 Siklus Kompresi Uap Standar (Teoritis)

Gambar 2.6 Proses siklus kompresi uap standar (Stoecker, Wilbert F. 1987. Refrigerasi dan Pengkondisian Udara. Jakarta: Penerbit ERLANGGA.)

Siklus kompresi uap standar merupakan siklus teoritis, dimana pada siklus tersebut mengasumsikan beberapa proses sebagai berikut :

1. Proses Kompresi

Proses kompresi berlangsung dari titik 1 ke titik 2. Pada siklus sederhana diasumsikan refrigeran tidak mengalami perubahan kondisi selama mengalir dijalur hisap. Proses kompresi diasumsikan isentropik sehingga pada diagram tekanan dan entalpi berada pada satu garis entropi konstan, dan titik 2 berada pada kondisi super panas. Proses kompresi memerlukan kerja dari luar dan entalpi uap naik dari h_1 ke h_2 , besarnya kenaikan ini sama dengan besarnya kerja kompresi yang dilakukan pada uap refrigeran.

$$W_c = h_2 - h_1 \dots\dots\dots(2.1)$$

$$W_c = h_2 - h_1$$

Karena energy kinetic (EK) dan energi potensial (EP) maka untuk kompresi isentropic ideal, tingkat keadaan dua ditentukan oleh entropi (sama dengan tingkat keadaan satu) dan tekanannya, sehingga untuk kompresor adalah:

$$W_c = h_2 - h_1$$

Maka untuk kerja mesin sesungguhnya adalah :

$$W_c = W_c / (\eta_c)$$

dimana :

W_c = besarnya kerja kompresor (kJ/kg)

h_1 = entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kJ/kg)

h_2 = entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kJ/kg)

η_c = Efisiensi isentropik kompresor (%)

2. Proses Kondensasi

Proses 2-3 merupakan proses kondensasi yang terjadi pada kondensor, uap panas refrigeran dari kompresor didinginkan oleh fluida sampai pada temperatur kondensasi, kemudian uap tersebut dikondensasikan. Pada titik 2 refrigeran pada kondisi uap jenuh pada tekanan dan temperatur kondensasi. Proses 2-3 terjadi pada tekanan konstan, dan jumlah panas yang dipindahkan selama proses ini adalah bedaentalpi antara titik 2 dan 3.

$$Q_c = h_2 - h_3 \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana :

Q_c = besarnya panas dilepas di kondensor (kJ/kg)

h_2 = entalpi refrigeran saat masuk kondensor (kJ/kg)

h_3 = entalpi refrigerant saat masuk kondensor (kJ/kg)

3. Proses Ekspansi

Proses ekspansi berlangsung dari titik 3 ke titik 4. Pada proses ini terjadi proses penurunan tekanan refrigeran dari tekanan kondensasi (titik 3) menjadi tekanan evaporasi (titik 4). Pada waktu cairan di ekspansi melalui katup ekspansi atau pipa kapiler ke evaporator, temperatur refrigeran juga turun dari temperatur kondensat ke temperatur evaporasi. Proses 3-4 merupakan proses ekspansi adiabatik dimana entalpi fluida tidak berubah disepanjang proses. Refrigeran pada titik 4 berada pada kondisi campuran-uap.

$$h_3 = h_4 \dots\dots(2.3)$$

4. Proses Evaporasi

Proses 4-1 adalah proses penguapan yang terjadi pada evaporator dan berlangsung pada tekanan konstan. Pada titik 1 seluruh refrigeran berada pada kondisi uap jenuh. Selama proses 4-1 entalpi refrigeran naik akibat penyerapan kalori dari ruang refrigerasi. Besarnya kalor yang diserap adalah beda entalpi titik 1 dan titik 4 biasa disebut dengan efek pendinginan. Tekanan entalpi siklus kompresi uap standart ditunjukkan pada Gambar 2.4.

$$Q_e = h_1 - h_4 \dots\dots(2.4)$$

dimana :

Q_e = besarnya panas yang diserap di evaporator (kJ/kg)

h_1 = entalpi refrigeran saat keluar evaporator (kJ/kg)

h_4 = entalpi refrigeran saat masuk evaporator (kJ/kg)

Selanjutnya refrigeran kembali masuk ke kompresor dan bersirkulasi lagi, begitu seterusnya sampai kondisi yang diinginkan tercapai.

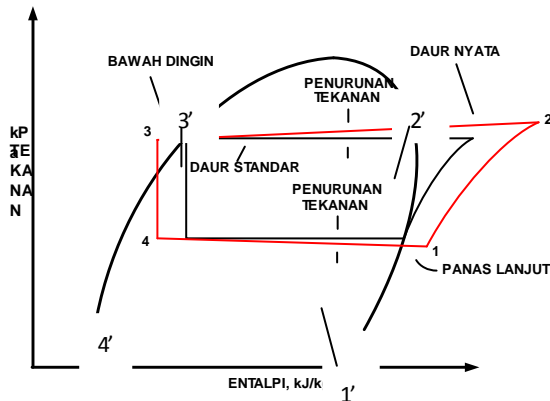
(Stoecker, Wilbert F. 1987. Refrigerasi dan Pengkondisian Udara. Jakarta: Penerbit ERLANGGA.)

2.3.3 Siklus Kompresi Uap Aktual

Siklus kompresi uap yang sebenarnya (aktual) berbeda dari siklus standar (teoritis). Perbedaan ini muncul karena asumsi yang ditetapkan dalam siklus standar. Pada siklus aktual terjadi pemanasan lanjut uap refrigeran yang meninggalkan evaporator sebelum masuk ke kondensor. Pemanasan lanjut ini terjadi akibat tipe peralatan ekspansi yang di gunakan atau dapat juga karena penyerapan panas dijalur masuk (*suction line*) antara evaporator dan kompresor. Demikian juga pada refrigeran cair mengalami pendinginan lanjut atau bawah dingin sebelum

masuk katup ekspansi atau pipa kapiler. Keadaan diatas adalah peristiwa normal dan melakukan fungsi yang diinginkan untuk menjamin bahwa seluruh refrigeran yang memasuki kompresor atau alat ekspansi dalam keadaan 100 % uap atau cair.

Perbedaan yang penting antara daur nyata (aktual) dan standar terletak pada penurunan tekanan dalam kondensor dan evaporator. Daur standar dianggap tidak mengalami penurunan tekanan pada kondensor dan evaporator, tetapi pada daur nyata terjadi penurunan tekanan karena adanya gesekan antara refrigeran dengan



Gambar 2.7. Perbandingan siklus aktual dan siklus standar

dinding pipa. Akibat dari penurunan tekanan ini, kompresor pada titik 1 dan 2 memerlukan lebih banyak kerja dibandingkan dengan daur standar. Untuk siklus aktual dan siklus standar ditunjukkan pada Gambar 2.5.

Garis 4-1' diperlihatkan penurunan tekanan yang terjadi pada refrigeran pada saat melewati *suction line* dari evaporator ke kompresor. Garis 1-1' diperlihatkan terjadinya panas lanjut pada uap refrigeran yang ditunjukkan dengan garis yang melewati garis uap jenuh. Proses 1'-2' adalah proses kompresi uap refrigeran didalam kompresor. Pada siklus teoritis proses kompresi diasumsikan isentropik, yang berarti tidak ada perpindahan kalor diantara refrigeran dan dinding silinder. Pada kenyataannya proses yang terjadi bukan isentropik maupun politropik. Garis 2'-3 menunjukkan adanya penurunan tekanan yang terjadi pada pipa-pipa kondensor. Sedangkan pada garis 3-3' menunjukkan tekanan yang terjadi di jalur cair.

2.4 Laju Perpindahan Panas Penukar Kalor

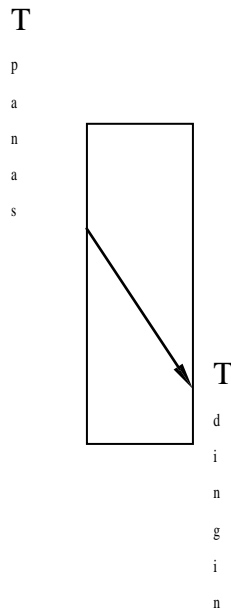
2.4.1. Proses Perpindahan Kalor

Perpindahan panas merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan

perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahnya suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.4.2. Perpindahan Kalor secara Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum.



Gambar 2.8. Perpindahan panas konduksi pada dinding (J.P. Holman, hal: 33)

Laju perpindahan panas yang terjadi pada perpindahan panas konduksi adalah berbanding dengan gradien suhu normal sesuai dengan persamaan berikut

Persama Dasar Konduksi :

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

Keterangan :

- q = Laju Perpindahan Panas (kj / det, W)
- k = Konduktifitas Termal (W/m.°C)
- A = Luas Penampang (m²)
- dT = Perbedaan Temperatur (°C, °F)
- dX = Perbedaan Jarak (m / det)
- ΔT = Perubahan Suhu (°C, °F)

dT/dx = gradient temperatur ke arah perpindahan kalor. konstanta positif "k" disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. (J.P. Holman, hal: 2)

Hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradient yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap waktu yang dikenal dengan hukum fourier.

Dalam penerapan hukum Fourier (persamaan 2.1) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan :

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

(J.P. Holman, hal: 26)

Bilamana konduktivitas termal (thermal conductivity) dianggap tetap. Tebal dinding adalah Δx , sedangkan T_1 dan T_2 adalah temperatur muka dinding. Jika konduktivitas berubah menurut hubungan linear dengan temperatur, seperti $k = k_0(1 + \beta T)$, maka persamaan aliran kalor menjadi :

$$q_k = -\frac{k_0 A}{\Delta x} \left[T_2 - T_1 + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2) \right] \dots\dots\dots(2.3)$$

(J.P. Holman, hal: 26)

Konduktivitas Termal

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan (2.1) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat tergantung pada suhu.

Daftar Tabel 2-1 Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada 0 °C

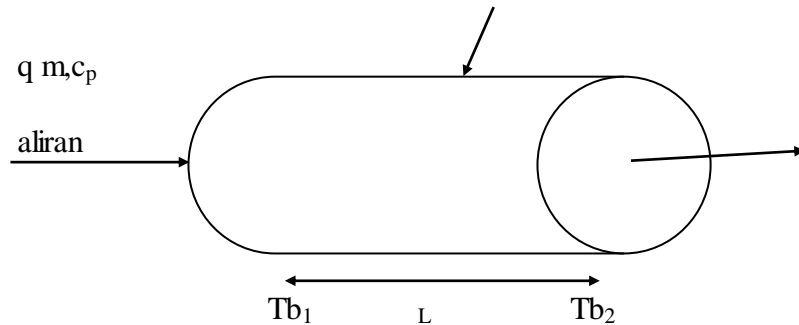
Konduktivitas termal		
K		
Bahan	W/m.°C	Btu/h . ft . °F
<i>Logam</i>		
<i>Perak (murni)</i>	410	237
<i>Tembaga (murni)</i>	385	223
<i>Aluminium (murni)</i>	202	117
<i>Nikel (murni)</i>	93	54
<i>Besi (murni)</i>	73	42
<i>Baja Karbon, 1% C</i>	43	25
<i>Timbal (murni)</i>	35	20,3
<i>Baja Karbon-Nikel (18%cr, 8% ni)</i>	16,3	9,4
<i>Bukan logam</i>		
<i>Kuarsa (sejajar sumbu)</i>	41,6	24
<i>Magnesit</i>	4,15	2,4
<i>Marmar</i>	2,08-2,94	1,2-1,7
<i>Batu Pasir</i>	1,83	1,06

<i>Kaca, Jendela</i>	0,78	0,45
<i>Kayu Maple atau ek</i>	0,17	0,096
<i>Serbuk Gergaji</i>	0,059	0,034
<i>Wol Kaca</i>	0,038	0,022
<hr/>		
<i>Zat Cair</i>		
<i>Air-Raksa</i>	8,21	4,74
<i>Air</i>	0,556	0,327
<i>Amonia</i>	0,540	0,312
<i>Minyak Lumas, SAE 50</i>	0,147	0,085
<i>Freon 12, 22 FCCI</i>	0,073	0,042
<hr/>		
<i>Gas</i>		
<i>Hidrogen</i>	0,175	0,101
<i>Helium</i>	0,141	0,081
<i>Udara</i>	0,024	0,0139
<i>Uap Air (jenuh)</i>	0,0206	0,0119
<i>Karbon Dioksida</i>	0,0146	0,00844

(J.P.Holman, hal: 7)

2.4.3. Perpindahan Kalor Secara Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free / natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa / eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*).



Gambar 2.8. Perpindahan panas konveksi (J.P.Holman, hal.: 252).

Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir didalam saluran tertutup seperti pada gambar 2.2 merupakan contoh proses perpindahan panas. Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan.

$$q = - hA (T_w - T_\infty) \dots\dots\dots(2.4)$$

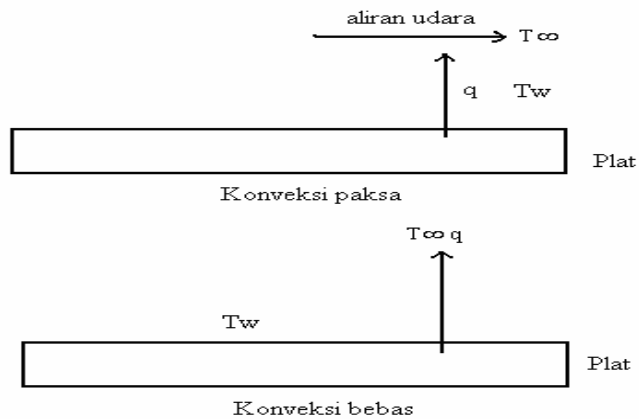
(J.P. Holman, 1994 hal: 11)

Keterangan :

- Q = Laju Perpindahan Panas (kj/det atau W)
- h = Koefisien perpindahan Panas Konveksi (W / m².°C)
- A = Luas Bidang Permukaan Perpindahan Panas (ft² , m²)
- T_w = Temperature Dinding (°C , K)
- T_∞ = Temperature Sekeliling (°C , K)

Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hokum II Thermodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda (+).

Persamaan (2.4) mendefinisikan tahanan panas terhadap konveksi. Koefisien pindah panas permukaan h , bukanlah suatu sifat zat, akan tetapi menyatakan besarnya laju pindah panas didaerah dekat pada permukaan itu.



Gambar 2.9 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan konveksi paksa dalam kenyataannya sering dijumpai, karena dapat meningkatkan efisiensi pemanasan maupun pendinginan satu fluida dengan fluida yang lain.

2.4.4. Bilangan Reynolds

Transisi dari aliran laminar menjadi turbulen terjadi apabila :

$$\frac{x \cdot U_{\infty}}{\nu} = \frac{\rho \cdot x \cdot U_{\infty}}{\mu} > 5 \times 10^5$$

Dimana U_{∞} = kecepatan aliran bebas

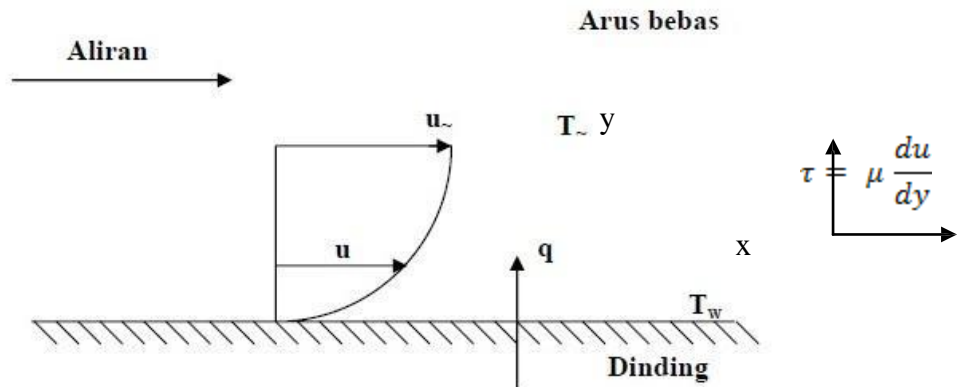
x = jarak dari tepi depan

ν = μ/ρ = viskositas kinematik

Pengelompokan khas diatas disebut angka Reynolds dan angka ini tak berdimensi apabila untuk semua sifat-sifat diatas digunakan perangkat satuan yang konsisten ;

$$Re_x = \frac{x U_{\infty}}{\nu} \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada konveksi pelat rata akan mendingin lebih cepat dapat dilihat pada gambar berikut ini :



Gambar 2.10 : perpindahan kalor secara konveksi pada suatu pelat rata

Keterangan :

- U = Koefisien Perpindahan Panas ($W / m^2 \cdot ^\circ C$)
- $U \blacksquare$ = Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh ($W / m^2 \cdot ^\circ C$)
- q = Laju Perpindahan Panas (kJ/det atau W)
- T_w = Temperature Dinding ($^\circ C, K$)
- $T \blacksquare$ = Temperature Sekeliling ($^\circ C, K$)

2.4.5 Alat Penukar Kalor (Heat Exchanger)

Alat penukar panas (*heat exchanger*) adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan panas antara dua buah fluida atau lebih yang memiliki perbedaan temperature yaitu fluida yang bertemperatur tinggi kefluida yang bertemperatur rendah. Perpindahan panas tersebut baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Pada kebanyakan sistem kedua fluida ini tidak mengalami kontak langsung. Kontak langsung alat penukar kalor terjadi sebagai contoh pada gas kalor yang terfluidisasi dalam cairan dingin untuk meningkatkan temperatur cairan atau mendinginkan gas.

Alat penukar panas banyak digunakan pada berbagai instalasi industri, antara lain pada : boiler, kondensor, cooler, cooling tower. Sedangkan pada kendaraan kita dapat menjumpai radiator yang fungsinya pada dasarnya adalah sebagai alat penukar panas.

Tujuan perpindahan panas tersebut di dalam proses industri diantaranya adalah :

- a) Memanaskan atau mendinginkan fluida hingga mencapai temperature tertentu yang dapat memenuhi persyaratan untuk proses selanjutnya, seperti pemanasan reaktan atau pendinginan produk dan lain-lain.
- b) Mengubah keadaan (fase) fluida : destilasi, evaporasi, kondensasi dan lain-lain.

Proses perpindahan panas tersebut dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung. Maksudnya adalah :

- 1) Pada alat penukar kalor yang langsung, fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu. Contohnya adalah clinker cooler dimana antara clinker yang panas dengan udara pendingin berkontak langsung. Contoh yang lain adalah cooling tower untuk mendinginkan air pendingin kondenser pada instalasi mesin pendingin sentral atau PLTU, dimana antara air hangat yang didinginkan oleh udara sekitar saling berkontak seperti layaknya air mancur.
- 2) Pada alat penukar kalor yang tidak langsung, fluida panas tidak berhubungan langsung dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panas itu mempunyai media perantara, seperti pipa, pelat atau peralatan jenis lainnya. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Contoh dari penukar kalor seperti ini sering kita jumpai antara lain radiator mobil, evaporator AC.

Pertukaran panas secara tidak langsung terdapat dalam beberapa tipe dari penukar kalor diantaranya tipe plat, shell and tube, spiral dll. Pada kebanyakan kasus penukar kalor tipe plat mempunyai efektivitas perpindahan panas yang lebih bagus.

2.4.6 Klasifikasi Alat Penukar Kalor

Adapun klasifikasi dari alat penukar kalor dapat dibagi dalam beberapa kelompok yaitu :

- Berdasarkan konstruksinya
 - 1) Tabung (*tubular*)
 - 2) Plate-Type
 - 3) Extended Surface
 - 4) Regenerative
- Berdasarkan pengaturan aliran
 - 1) Single Pass
 - 2) Multi Pass
- Berdasarkan jenis aliran
 - 1) Aliran Berlawanan Arah (*Counter Flow*)
 - 2) Aliran Sejajar (*Parallel Flow*)
 - 3) Aliran Silang (*Cross Flow*)
 - 4) Aliran Terpisah (*Split Flow*)
 - 5) Aliran Bercabang (*Divide Flow*)
- Berdasarkan banyaknya laluan
 - 1) Seluruh Cross-counter flow
 - 2) Seluruh cross-parallel flow
 - 3) Parallel counter flow
- Berdasarkan mekanisme perpindahan panas
 - 1) Konveksi satu fasa (dengan konveksi paksa atau alamiah)
 - 2) Konveksi dua fasa (dengan konveksi paksa atau alamiah)
 - 3) Kombinasi perpindahan panas

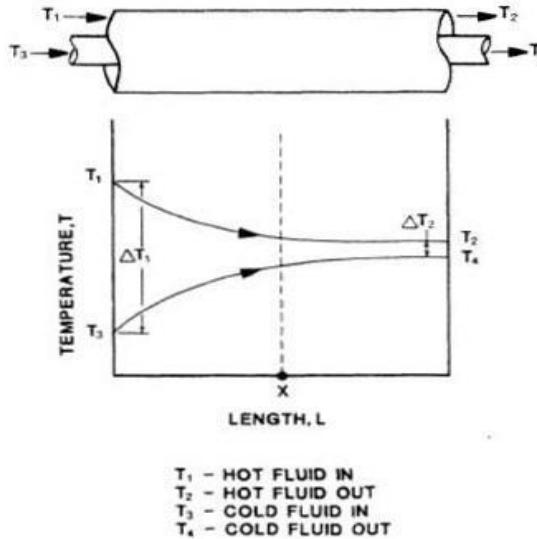
Klasifikasi Penukar Kalor *Shell and Tube* berdasarkan susunan aliran fluida.

Yang dimaksud dengan susunan aliran fluida di sini adalah berapa kali fluida mengalir sepanjang penukar kalor sejak saat masuk hingga meninggalkannya serta bagaimana arah aliran relatif antara kedua fluida (apakah sejajar/parallel,

berlawanan arah/counter atau bersilangan/cross).

a) Pertukaran panas dengan aliran searah (co-current/parallel flow)

yaitu apabila arah aliran dari kedua fluida di dalam penukar kalor adalah sejajar. Artinya kedua fluida masuk pada sisi yang satu dan keluar dari sisi yang lain mengalir dengan arah yang sama. Karakter penukar panas jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar.



Gambar 2.11 aliran parallel flow dan profil temperatur

$$q = \dot{m} \cdot c \cdot (T_1 - T_2) = \dot{m} \cdot c \cdot (T_4 - T_3) \dots\dots(2.7)$$

Dimana: q = laju perpindahan panas (watt)

\dot{m} = laju alir massa fluida (kg/s)

c = kapasitas kalor spesifik (j/kg⁰C) T = suhu fluida (⁰C)

Dengan assumpsi nilai kapasitas kalor spesifik (c_p) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas ke lingkungan serta keadaan steady state, maka kalor yang dipindahkan :

$$q = U \cdot A \cdot T_{LMTD} \dots\dots\dots(2.8)$$

Dimana :

U = koefisien perpindahan panas secara keseluruhan

(W / m².⁰C) A = luas perpindahan panas (m²)

Dan juga mempunyai nilai T_{LMTD} sebagai berikut

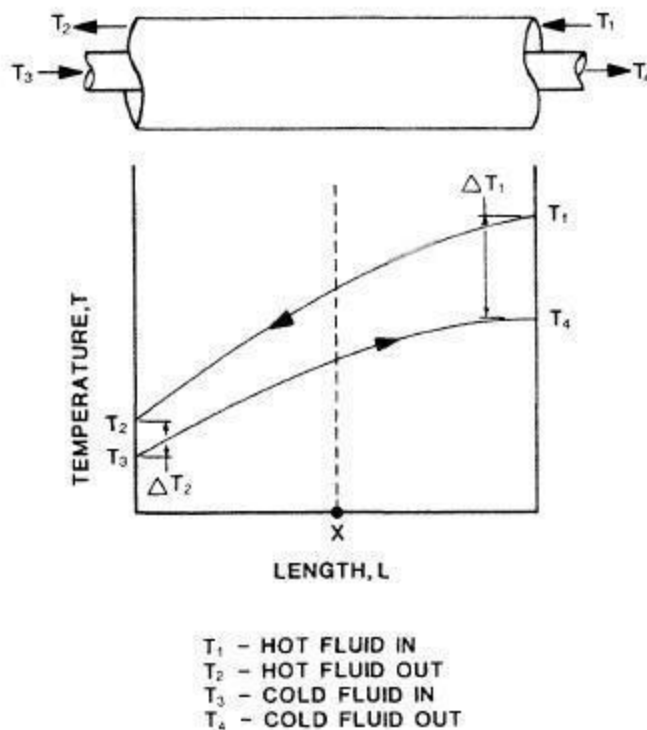
$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \dots\dots\dots(2.9)$$

dimana : $\Delta T_2 = T_2 - T_4$

$\Delta T_1 = T_1 - T_3$

b) Pertukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter current / flow*)

yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima panas (temperatur fluida dingin) saat keluar penukar kalor (T_4) lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor (temperatur fluida panas) saat meninggalkan penukar kalor.



Gambar 2.12 aliran counter flow dan profil temperature

Dari gambar diatas, laju perpindahan panasnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q = \dot{m}_h \cdot c_h \cdot (T_1 - T_2) = \dot{m}_c \cdot c_c \cdot (T_4 - T_3) \dots\dots(2.10)$$

Dimana: q = laju perpindahan panas (*watt*)

\dot{m} = laju alir massa fluida (kg/s)

C = kapasitas kalor spesifik ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$) T = suhu fluida ($^\circ\text{C}$)

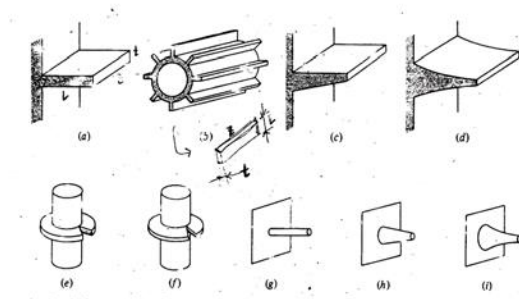
Dan juga mempunyai nilai T_{LMTD} sebagai berikut

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \dots\dots\dots(2.11)$$

dimana : $\Delta T_2 = T_1 - T_4$

$\Delta T_1 = T_2 - T_3$

2.5 Sirip (*fin*)

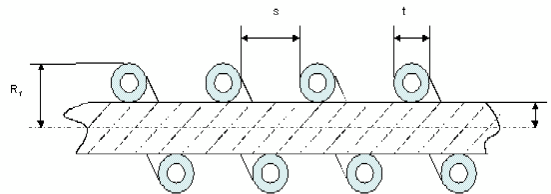


Gambar 9. Berbagai Jenis Muka Sirip.

Untuk memudahkan dalam perhitungan sirip, maka diperlukan asumsi-asumsi yang diberikan oleh Murray dan Gardner (Kern, 1988), yaitu:

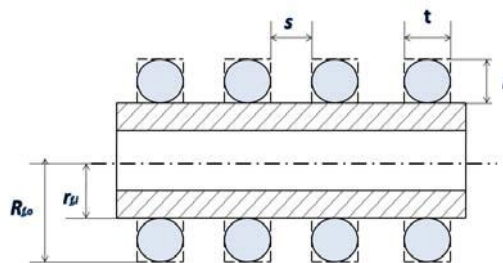
1. Aliran panas dan distribusi temperatur yang melalui sirip tidak tergantung waktu (*steady state*).
2. Material dari sirip *homogen* dan *isotropic*.
3. Tidak ada sumber panas dari sirip.
4. Konduktifitas panas dari sirip konstan.
5. Koefisien perpindahan panas sama pada sisi masuk sirip.

6. Panas yang dipindahkan lewat sudut luar dari sirip diabaikan dibandingkan dengan yang melewati sirip.
7. Sambungan antar sirip dan pipa diasumsikan tidak ada tahanan.



Gambar 10. Kombinasi Dimensi Analisis Sirip Transversal dengan Alur Helic.

Dalam hal ini, untuk jenis sirip yang berpenampang lingkaran tidak ditemukan analisis teorinya. Oleh sebab itu dalam menganalisis sirip yang berpenampang lingkaran dilakukan dengan cara pendekatan terhadap penampangnya, yaitu dengan pendekatan penampang segi empat.



Gambar 11. Pendekatan sirip tranfersal penampang segi empat

Untuk mencari efisiensi pada sirip, dicari dulu perpindahan kalor yang terjadi apabila tanpa sirip. Perpindahan kalor yang terjadi apabila tanpa sirip dapat didefinisikan sebagai berikut:

$$q_{no.f} = U \cdot A_{no.f} \cdot \Delta T \dots \dots \dots (12)$$

$$A_{no.f} = \pi \cdot d_o \cdot L \dots \dots \dots (13)$$

Dimana:

U = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)

$A_{no.f}$ = Luasan kontak tanpa sirip (m^2)

ΔT = Beda temperatur (K)

d_o = Panjang penukar kalor (m)

Untuk mencari perpindahan kalor dengan sirip dan luasan pada sirip dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A_{fin} = 2 \pi (r_2^2 - r_1^2) + 2 \pi r_2 t$$

$$q_f = \eta_f q_{max} \text{ atau } \eta_f U A_f \Delta T$$

$$\varepsilon = \frac{r}{r_1}$$

Dimana :

A_{fin} = Luasan pada sirip (m^2)

$r_{f,o}$ = Jari-jari luar sirip (m)

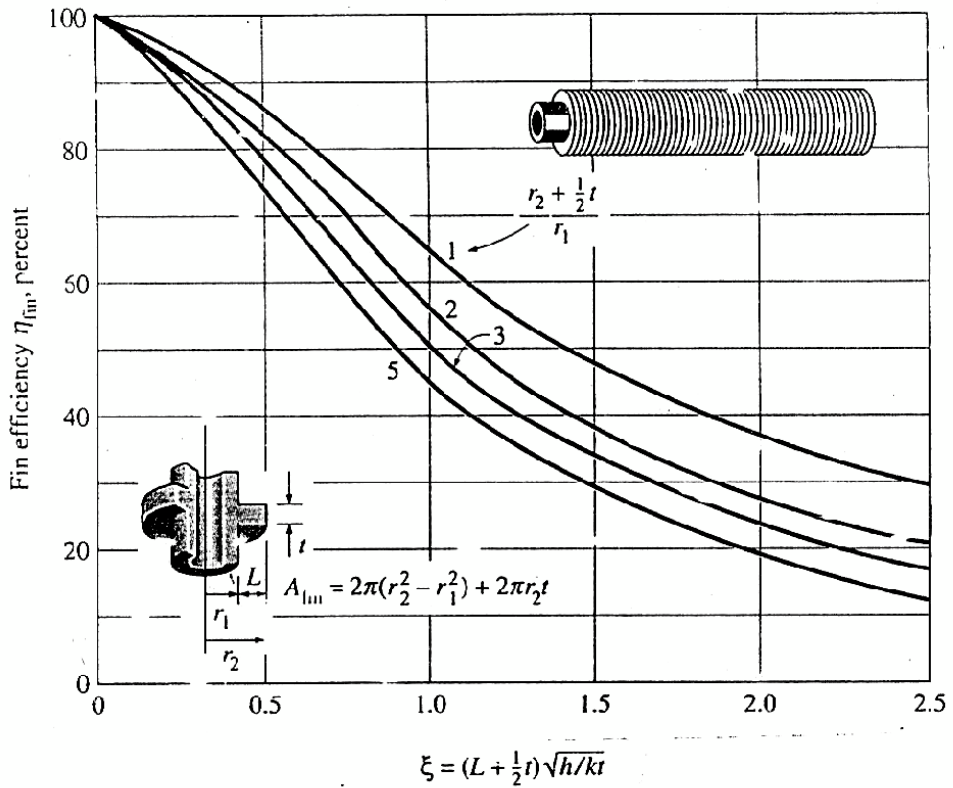
$r_{f,I}$ = Jari-jari dasar sirip (m)

t = Tebal sirip (m)

L = Kedalaman sirip (m)

q_f = Perpindahan kalor dengan sirip (W/m^2)

η_f = Efisiensi sirip (Didapat dari table figure 3-43)



Gambar 12. Diagram Teoritis Efisiensi Sirip Transversal dengan Penampang Segi-empat

Tidak semua bagian annulus diselimuti oleh sirip, maka perumusannya juga lain. Untuk pipa yang tidak diselimuti oleh sirip dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A_{un,f} = \pi \cdot d_{f,i} \cdot s \dots\dots\dots (17)$$

$$q_{unf} = U \cdot A_{un.f} \cdot$$

$$\Delta T \dots\dots\dots (18)$$

Dimana :

- $A_{un,j}$ = Luasan yang tidak diselimuti oleh sirip (m)
- d_f = Diameter dasar sirip (m)
- s = Jarak antar sirip (m)

Perpindahan kalor total pada sirip didefinisikan sebagai berikut:

$$q_{tot,f} = n \cdot (q_{unf} + q_f) \dots\dots\dots(19)$$

Dimana :

n = Banyaknya sirip yang terpasang pada penukar kalor

Peningkatan atau keefektifan dari sirip dapat dihitung dengan rumus:

$$q_{increase} = q_{tot,f} - q_{no,f} \dots\dots\dots(20)$$

Jadi efektifitas dari sirip dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$\epsilon_{f,overall} = \frac{q_{tot,f}}{q_{tot,no,f}} \dots\dots\dots(21)$$

Efektifitas sirip diharapkan sebesar mungkin. Sirip dikatakan efektif bilamana $\sum_f \geq 2$ (Incropera Hal. 120, 1996).

2.6 Prestasi Unjuk Kerja Mesin Pendingin Daya Input Kompresor

Merupakan kerja yang dilakukan untuk menaikkan tekanan dari tekanan rendah evaporator ketekanan tinggi kondensor, kerja yang diberikan kompresor dalam bentuk daya listrik untuk menggerakkan kompresor dirumuskan :

$$W_{in} = V \cdot A \cdot \cos \theta \text{ (Watt)}$$

Dimana :

V = Tegangan saat alat bekerja (Volt)

A = Arus saat alat semua bekerja (Ampere)

Cos θ = factor koreksi listrik (0,7 – 0,9)

Daya Yang Diterima Refrigerant

Merupakan jumlah daya yang diterima refrigerant untuk menaikkan tekanan evaporator ke tekanan kondensor. Rumus yang dipakai adalah :

$$W_{ref} = \dot{m} (h_2 - h_1) \text{ (Watt)}$$

Dimana :

\dot{m} = laju aliran massa (lbm/ min)

h_2 = enthalpy refrigerant pada keluaran kondensor (Btu/lbm)

h_1 = enthalpy refrigerant pada masukan kompresor (Btu/lbm)

Kerja Kompresor

Adalah kerja yang didapatkan dari perbedaan enthalpy refrigerant yang keluar dan masuk kompresor. Rumus yang digunakan adalah :

$$W = h_2 - h_1 \text{ (Btu/lbm)}$$

Dimana :

h_2 = enthalpy refrigerant pada keluaran kompresor (Btu/lbm)

h_1 = enthalpy refrigerant pada masukan kompresor (Btu/lbm)

Kerja Evaporator

Adalah jumlah panas yang diserap refrigerant saat melalui evaporator. Rumus yang digunakan adalah :

$$Q_E = \dot{m} (h_1 - h_4) \text{ (Watt)}$$

Dimana :

h_1 = enthalpy refrigerant pada masukan kompresor (Btu/lbm)

h_4 = enthalpy refrigerant pada keluaran evaporator (Btu/lbm)

Efek Refrigerant

Adalah jumlah kalor yang dikeluarkan oleh refrigerant dalam evaporator pada laju aliran refrigerant. Rumus yang digunakan adalah :

$$q_e = h_1 - h_4 \text{ (Btu/lbm)}$$

Dimana :

$$q_e = \text{Efek refrigerant (Btu/lbm)}$$

$$h_1 = \text{enthalpy refrigerant pada masukan kompresor (Btu/lbm)}$$

$$h_4 = \text{enthalpy refrigerant pada keluaran evaporator (Btu/lbm)}$$

Laju pelepasan kalor di Kondensor

Adalah panas yang dilepaskan refrigerant saat melalui kondensor. Rumus yang digunakan :

$$Q_c = \dot{m} (h_2 - h_3) \text{ (watt)}$$

Dimana :

$$\dot{m} = \text{laju aliran masa (Ibm / min)}$$

$$h_2 = \text{enthalpy refrigerant pada keluaran kondensor (Btu / Ibm)}$$

$$h_3 = \text{enthalpy refrigerant pada masukan kondensor (Btu /Ibm)}$$

Panas yang dibuang Kondensor dan Penukar Panas Helikal

Adalah kalor yang dikeluarkan oleh refrigerant dalam kondensor dan penukar panas helikal pada laju aliran refrigerant. Rumus yang digunakan adalah :

$$q_c = h_2 - h_3 \text{ (Btu / Ibm)}$$

Dimana :

$$q_c = \text{Panas yang dibuang kondensor (Btu / Ibm)}$$

$$h_2 = \text{Enthalpy refrigerant pada keluaran kondensor (Btu / Ibm)}$$

$$h_3 = \text{Enthalpy refrigerant pada masukan kondensor (Btu / Ibm)}$$

Coefficient Of Performance (COP)

Adalah kapasitas refrigerant terhadap daya yang diberikan ke sistem rumus yang digunakan adalah :

$$\text{COP} = \frac{\text{Kapasitas Pendingin}}{\text{Kerja Kompresor}}$$

$$\text{COP} = \frac{q_e}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$