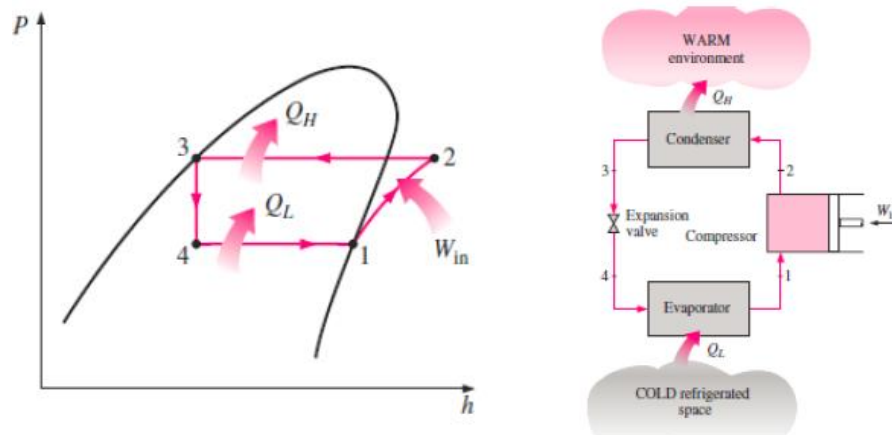


## 2. DASAR TEORI

### 2.1. Siklus Kompresi Uap Ideal

Siklus pendingin kompresi uap ideal merupakan siklus yang sering diaplikasikan atau digunakan pada mesin pendingin karena siklus ini cukup sederhana dan *Coefficient of Performance* (COP) yang didapatkan juga cukup baik. Menurut Cengel (2005) dan Incropera (2011), siklus ini terdiri dari empat komponen utama, yaitu:

1. Evaporator
2. Kompresor
3. Kondensor
4. Katup ekspansi



Gambar 2.1 Diagram P-h dan Urutan Kerja Sistem Kompresi Uap Ideal  
Sumber : (Cengel, 2005)

Prinsip kerja siklus dimulai dari nomor 1 ketika refrigerant dalam fase uap jenuh di dalam kompresor dinaikkan tekanannya, yang menyebabkan suhu refrigerant meningkat.

Ketika refrigerant mencapai titik 2, fase refrigerant berubah menjadi *superheat vapor*. Setelah keluar dari kompresor, refrigerant masuk ke kondensor. Saat berada di kondensor, refrigerant melepas sejumlah kalor ke lingkungan dan berkondensasi sehingga suhu refrigerant menurun dan fase berubah menjadi cair jenuh kembali.

Setelah keluar dari kondensor seperti yang terlihat pada titik 3, refrigerant memasuki *expansion valve*. Fase refrigerant sudah kembali menjadi cair jenuh tetapi masih dalam tekanan yang tinggi. Saat mencapai *expansion valve*, refrigerant mengalami ekspansi sehingga tekanan menurun dan berujung pada penurunan suhu.

Pada titik 4, fase refrigerant menjadi campuran antara cairan dan uap. Kemudian refrigerant memasuki evaporator untuk menyerap kalor dan membuat campuran berubah fase menjadi uap jenuh. Selanjutnya siklus akan berulang terus-menerus.

## **2.2. *Fast Chiller***

*Blast chiller* merupakan mesin pendingin yang menggunakan udara yang disemprotkan sebagai media pendinginan sedangkan *fast chiller* tidak. Siklus yang dipilih untuk *fast chiller* adalah siklus kompresi uap ideal. Siklus ini memiliki sistem yang sederhana namun cukup kompak, komponen-komponen yang digunakan cukup sederhana, dan tidak membutuhkan ruang besar.

Menurut ASHRAE (2012), siklus pendingin kompresi uap terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu evaporator, kompresor, kondensor, dan alat ekspansi. Disamping itu juga terdapat beberapa komponen tambahan yaitu *filter dryer*, *receiver tank*, dan *accumulator*.

### **2.2.1. Kompresor**

Menurut Dinçer (2003), kompresor mempunyai fungsi utama untuk meningkatkan tekanan fluida. Kompresor biasanya menggunakan motor listrik, mesin diesel atau mesin bensin sebagai tenaga penggerakannya. Fluida bertekanan hasil dari kompresor biasanya digunakan pada pengecatan dengan teknik *spray/air brush*, untuk mengisi angin ban, pembersihan, pneumatik, dsb. Jenis kompresor berdasarkan motor yang digerakkan ada tiga, yaitu kompresor hermetik, semi-hermetik dan *open type*.

### 2.2.1.1. Kompresor Hermetik

Kompresor Hermetik seperti pada Gambar 2.2 merupakan kompresor yang memiliki fungsi yang sama dengan kompresor yang lain. Letak perbedaannya adalah bagian motor penggerak dan bagian yang digerakkannya berada dalam satu rumah atau *housing*. Kekurangan kompresor tipe hermetik adalah apabila salah satu dari bagian dalam kompresor tersebut rusak, harus dibuka seluruh bagian *housing*nya, bahkan harus diganti dengan kata lain tidak dapat dibetulkan. Sedangkan kelebihan dari kompresor ini yaitu lebih murah karena kompresor tipe ini biasa digunakan untuk kebutuhan mesin pendingin komersial atau yang biasa digunakan dirumah.



Gambar 2.2 Kompresor Hermetik

Sumber : <http://www.yilmazsogutma.com.tr/product/93/Hermetik-Kompresor>

### 2.2.1.2. Kompresor Semi Hermetik

Kompresor Semi Hermetik seperti pada gambar 2.3 merupakan kompresor dimana letak bagian yang digerakkan dengan motor penggeraknya terpisah. Hanya saja tetap berada pada satu rumah atau *housing* yang sama. Kelebihan kompresor tipe ini yaitu, apabila terdapat kerusakan pada salah satu komponennya atau motor terbakar, maka komponen kompresor yang rusak tersebut dapat diganti dan kompresor pun dapat dibuka dan ditutup kembali. Dengan catatan ditutup kembali dengan rapat, agar tidak ada kebocoran ketika kompresor digunakan dan diisi dengan refrigerant.



Gambar 2.3 Kompresor Semi Hermetik

Sumber : <http://nordavento.com/bg/category/semi-hermetik-kompresorler/>

### 2.2.1.3. Kompresor *Open Type*

Kompresor *open type*, merupakan kompresor dimana letak bagian penggerak dan bagian yang digerakkannya berada pada tempat dan rumah yang terpisah. Kelebihan dari kompresor ini adalah apabila terdapat kerusakan pada salah satu komponen, maka komponen tersebut dapat dibetulkan ataupun diganti tanpa harus membuka kedua rumah (hanya membuka casing yang didalamnya terdapat komponen yang rusak). Bentuk kompresor *open type* ditunjukkan oleh Gambar 2.4



Gambar 2.4 Kompresor *Open Type*

Gambar : <http://www.refrigerasi.com/category/kompresor/>

### 2.2.2. Kondensor

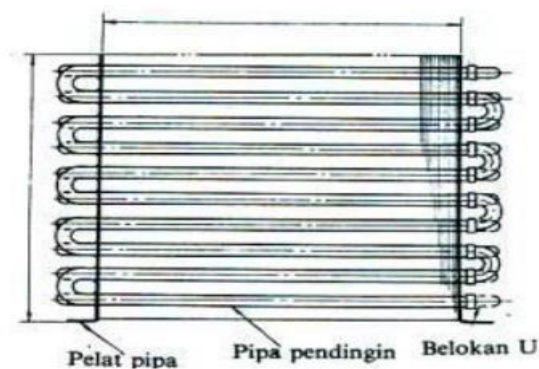
Menurut Cengel (2005), kondensor merupakan alat penukar kalor yang berfungsi untuk mengembunkan uap refrigerant yang mengalir dari kompresor. Untuk mengembunkan uap refrigerant yang bertekanan dan bertemperatur tinggi diperlukan usaha untuk melepaskan kalor dengan cara mendinginkan uap refrigerant tersebut. Secara umum terdapat tiga jenis kondensor yaitu kondensor berpendingin udara (*air cooled*), berpendingin air (*water cooled*) dan *evaporative*

kondensor. Jenis kondensor yang banyak digunakan pada mesin pendingin makanan skala kecil adalah kondensor dengan pendinginan udara (*air cooled condensor*).

### 2.2.2.1. Kondensor Berpendingin Udara

Kondensor berpendingin udara adalah kondenser yang menggunakan udara sebagai media pendinginnya, biasanya kondenser ini digunakan pada sistem berskala rendah dan sedang. Kondensor berpendingin udara terdiri dari pipa tembaga yang dibentuk coil yang dilengkapi dengan rangkaian lembaran tipis alumunium yang disebut *fin* untuk meningkatkan luas permukaan transfer panas. Bagian kondensor berpendingin udara ditunjukkan oleh Gambar 2.5.

Ada dua metode dalam mengalirkan udara, yaitu konveksi alamiah dan konveksi paksa dengan bantuan kipas. Konveksi secara alamiah mempunyai laju aliran udara yang rendah, karena hanya mengandalkan kecepatan angin yang ada di sekitar kondensor. Oleh karena itu kondenser jenis ini hanya cocok untuk unit-unit yang kecil seperti kulkas untuk keperluan rumah tangga. Kondenser berpendingin udara yang menggunakan bantuan kipas dalam menyirkulasikan media pendinginannya yang dikenal sebagai kondenser berpendingin udara konveksi paksa.

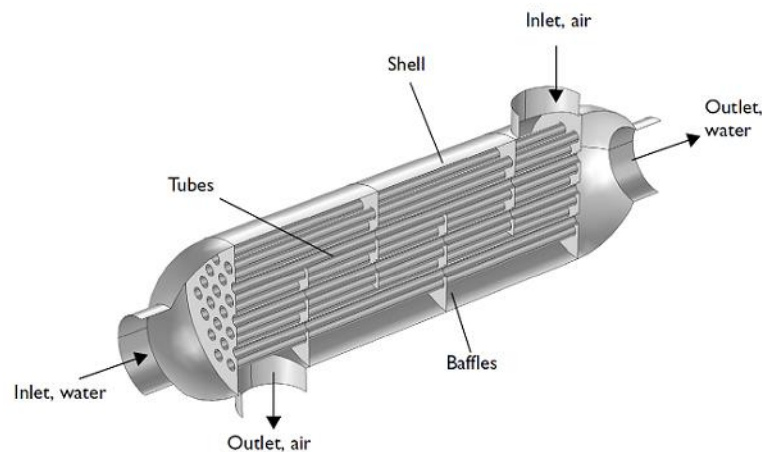


Gambar 2.5 Kondensor Berpendingin Udara  
Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

Refrigerant dari kompresor dengan suhu dan tekanan tinggi mengalir ke bagian paling atas dari kondensor. Setelah refrigerant mengalami proses pendinginan oleh udara luar (membuang kalor) maka terjadi perubahan wujud refrigerant dari gas menjadi cair dan keluar melalui bagian bawah kondensor.

#### 2.2.2.2. Kondensator Berpendingin Air

Kondensator dengan pendinginan air digunakan pada sistem yang berskala besar untuk keperluan komersial di lokasi yang mudah memperoleh air bersih. Kondensator berpendinginan air biasanya menjadi pilihan yang ekonomis bila terdapat suplai air bersih secara mudah dan murah. Faktor lain yang perlu mendapat pertimbangan adalah adanya tumpukan kotoran dan kerak air di dalam pipa-pipa air pendingin bila kualitas airnya tidak bagus. Pada kondensator jenis ini, suhu dan banyaknya air sebagai media pendingin kondensator akan menentukan suhu dan tekanan *condensing* dari sistem refrigerasinya dan secara tidak langsung juga akan menentukan kapasitas kompresinya. Terdapat tiga jenis kondensator berpendingin air yaitu *shell & tube*, *shell & coil*, dan *tube in tube*. Dari ketiga jenis tersebut, jenis yang paling umum digunakan adalah tipe *shell & tube*. Gambar 2.6 menunjukkan konstruksi *shell & tube*.



Gambar 2.6 Kondensator Berpendingin Air Jenis *Shell & Tube*

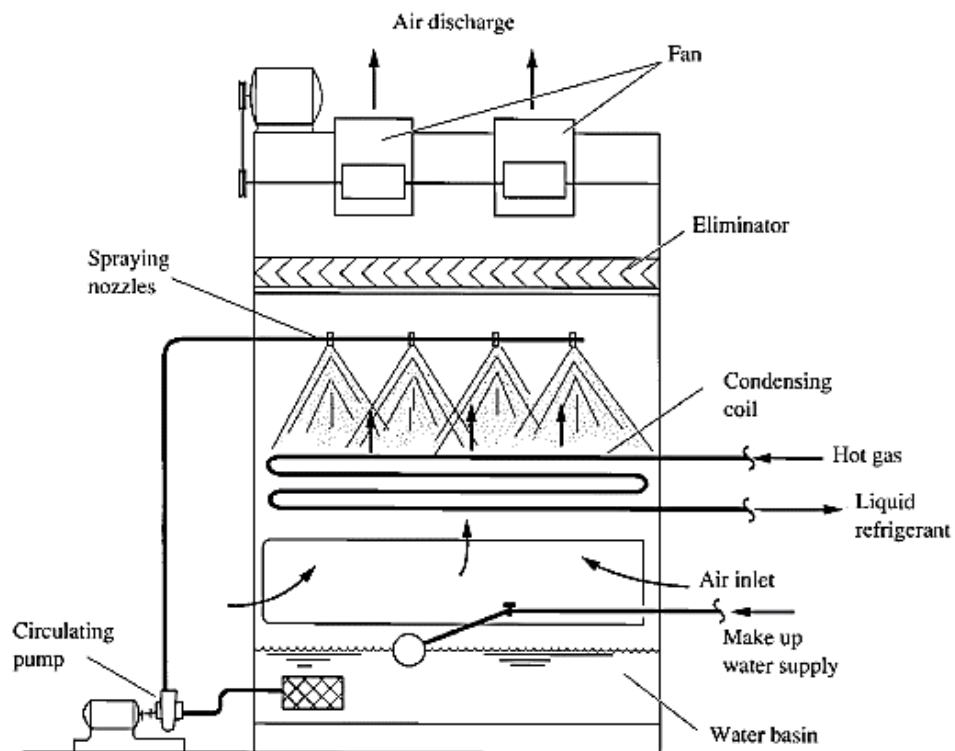
Sumber : <https://www.comsol.com/how-model-shell-and-tube-heat-exchanger/>

#### 2.2.2.3. *Evaporative* Kondensator

Pada sistem ini panas dipindahkan dengan menggunakan air dan udara yang dimodifikasi sedemikian rupa sehingga dapat menghasilkan efek yang baik bagi kapasitas kondensator. Kondensator jenis ini didinginkan langsung dengan air yang disemurkan dan hembusan udara yang menambah efek pendinginan kondensator. Tingkat keefektifan *evaporative* kondensator tergantung pada suhu *wet bulb* dari udara yang masuk ke dalam unitnya, di mana suhu *wet bulb* tersebut

ditentukan oleh suhu penyemprotan airnya. *Condensing unit* jenis ini biasanya digunakan untuk sistem yang berkapasitas di atas 100 ton refrigerasi.

Selama beroperasi, pompa akan menyirkulasikan air pendingin dari *water basin* menuju coil kondensor melalui *spray nozzle* seperti pada Gambar 2.7, dalam hal ini diperlukan suplai air tambahan untuk mencegah kotoran/lumpur masuk dan menempel pada permukaan coil kondensornya dan disamping itu juga digunakan untuk mengurangi efek keasaman air pendinginnya. *Centrifugal fan* di dalam pompa akan menghisap panas yang dikandung udara dan air. Udara ditarik dari bagian bawah menuju ke atas melalui rangkaian pipa refrigeran, eliminator dan *fan*. Pipa refrigeran tidak dilengkapi dengan *fin* agar tidak terjadi penimbunan kotoran dan debu pada pipa yang dapat mengganggu aliran udaranya.



Gambar 2.7 *Evaporative Kondensor*

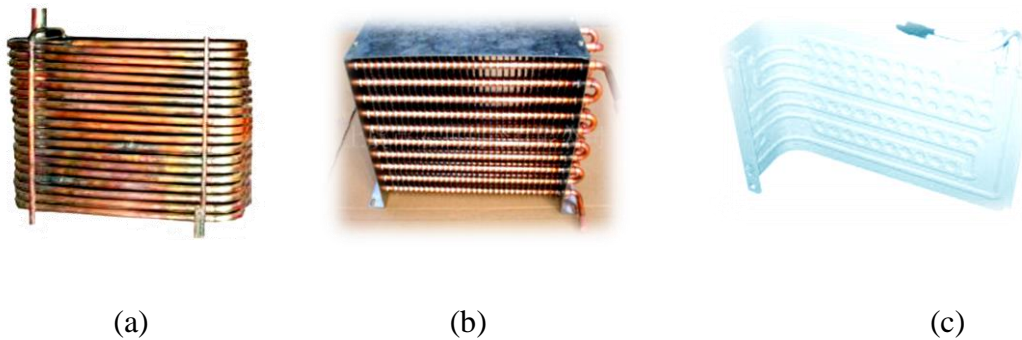
Sumber :. <http://www.baltimoreaircoil.com/english/products/evaporative-condensers/series-v/engineering-considerations>

### 2.2.3. Evaporator

Menurut Cengel (2005), evaporator adalah suatu alat penukar kalor yang memindah kalor dari benda yang ingin didinginkan ke refrigerant. Pada

prinsipnya perpindahan panas yang terjadi dalam evaporator sama dengan perpindahan panas yang terjadi pada kondensor. Hanya saja di dalam kondensor, panas dilepas atau dibuang oleh refrigerant ke media pendingin kondensor sedangkan di dalam evaporator kalor diserap oleh refrigerant dari media yang didinginkan. Pada Gambar 2.8 ada tiga macam konstruksi evaporator yaitu:

1. *Bare surface*
2. *Finned tube*
3. *Plate tube*



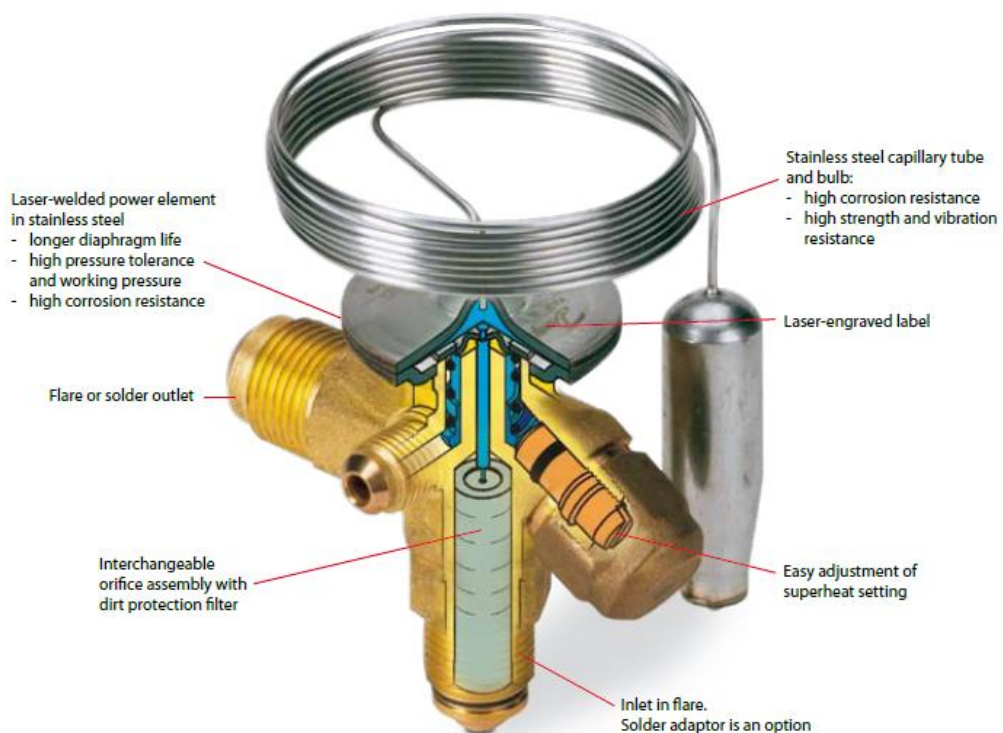
Gambar 2.8 (a) *Bare Tube*, (b) *Finned Tube*, (c) *Plate Surface* Evaporator  
Sumber : <http://www.brighthubengineering.com/hvac/61270-types-of-refrigeration-evaporators/#>

Kelebihan pada evaporator jenis *bare tube* yaitu pipa dapat ditekuk atau dibentuk mengikuti bentuk kabin penyimpanan makanan. Dari segi laju perpindahan panas, evaporator jenis *finned tube* lebih baik karena sirip-sirip pada pipa evaporator dapat meningkatkan laju perpindahan panas.

#### 2.2.4. Katup Ekspansi

Katup ekspansi digunakan untuk mengekspansi secara adiabatik cairan refrigerant yang bertekanan dan bertemperatur tinggi sampai mencapai kondisi tekanan dan temperatur pada entalpi konstan. Selain itu katup ekspansi mengatur pemasukan debit refrigerant sesuai dengan beban pendinginan yang harus ditanggung oleh evaporator. Terdapat beberapa jenis katup ekspansi, diantaranya yaitu *Thermostatic Expansion Valve (TXV)*, *Automatic Expansion Valve (AXV)*, *capillary tube* dan *float valves*. Diantara keempat jenis tersebut, TXV merupakan alat yang paling sering digunakan.

Menurut Dinçer (2003), TXV merupakan katup yang menyeimbangkan antara tekanan tinggi dan tekanan rendah dari sistem seperti yang terlihat pada Gambar 2.9. Pada TXV, tabung sensor termal diletakkan pada saluran keluar evaporator, sehingga dapat merasakan perubahan suhu gas yang mengalir keluar dari evaporator. Perubahan kondisi *superheat* pada refrigerant saat keluar dari evaporator berpengaruh terhadap tabung sensor termal. Tekanan uap jenuh didalam tabung sensor termal menekan bagian atas diafragma ke bagian bawah untuk membuka lubang katup. Tekanan di bagian bawah diafragma menekan ke atas untuk menutup lubang katup.



Gambar 2.9 *Thermostatic Expansion Valve*

Sumber : [http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/PBAA0A402\\_T2.pdf](http://files.danfoss.com/TechnicalInfo/Dila/01/PBAA0A402_T2.pdf)

### 2.2.5. *Filter Dryer*

*Filter dryer* adalah sebuah komponen tambahan pada suatu sistem pendingin (Gambar 2.10). Menurut ASHRAE (2012), fungsi dari *filter dryer* adalah menyaring semua kotoran, uap air, ataupun kandungan asam yang ada pada

refrigerant supaya unsur-unsur tersebut tidak merusak komponen lain khususnya kompresor.



Gambar 2.10 *Filter Dryer*  
Sumber : [gzhuaya.company.weiku.com](http://gzhuaya.company.weiku.com)

### 2.2.6. *Receiver Tank*

Menurut ASHRAE (2012), *receiver tank* pada Gambar 2.11 merupakan komponen tambahan dalam suatu sistem pendingin yang berfungsi untuk menampung refrigerant fase cair yang berlebih dari keluaran kondensor. Hal itu disebabkan dari temperatur lingkungan yang terlalu rendah sehingga mempercepat proses kondensasi.



Gambar 2.11 *Receiver Tank*  
Sumber : [www.ecvv.com](http://www.ecvv.com)

### 2.2.7. *Accumulator*

Menurut ASHRAE (2012), *accumulator* pada Gambar 2.12 adalah komponen tambahan pada sistem pendingin yang berfungsi untuk memisahkan fase gas dengan fase cair refrigerant sebelum masuk kompresor.



Gambar 2.12 *Accumulator*  
Sumber : [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)

### **2.2.8. Refrigerant**

Menurut Miller (2006), refrigerant adalah suatu fluida kerja yang digunakan sebagai media penghantar kalor. Refrigerant berperan untuk menyerap kalor dalam substansi atau ruangan yang ingin didinginkan pada tekanan dan temperatur rendah, kemudian membuang kalor tersebut ke lingkungan pada tekanan dan temperatur yang tinggi. Refrigerant biasanya mengalami perubahan fase dalam suatu siklus. Pada saat keluar evaporator, refrigerant berwujud uap. Pada saat keluar dari kondensor, refrigerant kembali berwujud cair.

Syarat dan ketentuan dalam penggunaan refrigerant cukup ketat mengingat beberapa bahaya dan dampak negatif yang ditimbulkan dari refrigerant itu sendiri. Pertama kali refrigerant mulai digunakan masih memiliki sifat beracun. Oleh karena itu refrigerant ditempatkan pada siklus tertutup dan tidak boleh terhirup oleh makhluk hidup. Selain beracun, refrigerant juga dapat terbakar sehingga refrigerant harus disimpan di tempat yang sangat aman.

#### **2.2.8.1 Refrigerant R-404a**

Refrigerant R-404a merupakan salah satu jenis refrigerant campuran HFC yang biasa digunakan untuk aplikasi suhu pendingin medium dan low. Komposisi refrigerant R-404a terdiri dari : HFC-125 (44%), HFC-143a (52%), HFC-134a (4%). Refrigerant ini tidak mudah terbakar dan tidak beracun.

### **2.3. Hukum Termodinamika I**

Menurut Cengel (2005), bunyi hukum termodinamika pertama adalah “energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan tetapi dapat dikonversi ke bentuk energi yang lain”. Hukum pertama adalah prinsip hukum kekekalan energi yang

memasukkan kalor sebagai model perpindahan energi. Pernyataan lain yang paling umum dari hukum termodinamika pertama ini adalah “kenaikan energi dalam suatu sistem termodinamika sebanding dengan jumlah energi panas yang ditambahkan ke dalam sistem dikurangi dengan kerja yang dilakukan oleh sistem”.

Dalam proses *steady flow*, volume, massa, kecepatan, dan total energi akan tetap atau konstan. Oleh karena itu total massa atau energi yang masuk dalam suatu sistem harus sama dengan massa atau energi yang keluar dari sistem tersebut. Hukum termodinamika dapat dinyatakan dalam Persamaan (2.1).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} \left[ (h_{out} - h_{in}) + \left( \frac{v_{out}^2 - v_{in}^2}{2} \right) + g(z_{out} - z_{in}) \right] \quad (2.1)$$

Ketika perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan maka persamaan keseimbangan energi menjadi Persamaan (2.2), yaitu:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m} (h_{out} - h_{in}) \quad (2.2)$$

Dimana :

$\dot{Q}$  = Kalor dalam sistem (kW)

$\dot{W}$  = Kerja dalam sistem (kW)

$\dot{m}$  = Laju alir massa (kg/s)

$h_{out}$  = entalpi refrigerant yang keluar (kJ/kg)

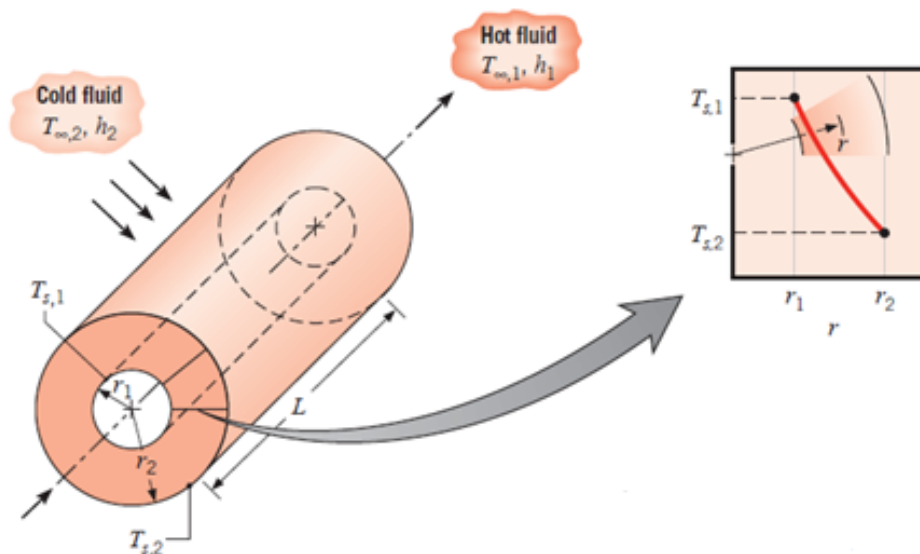
$h_{in}$  = entalpi refrigerant yang masuk (kJ/kg)

## 2.4. Perpindahan Panas

Ketika ada perbedaan suhu maka perpindahan panas dapat terjadi. Kalor akan berpindah dari suhu yang tinggi ke suhu yang rendah.

### 2.4.1 Konduksi

Konduksi merupakan perpindahan kalor suatu zat melalui media penghantar tanpa disertai perpindahan bagian-bagian zat tersebut. Jika sistem media perpindahan panas berupa silinder maka besar tahanan konduksi silinder dinyatakan dengan Persamaan (2.3). Gambar 2.13 menunjukkan proses perpindahan panas secara konduksi pada silinder



Gambar 2.13 Perpindahan Panas secara Konduksi pada Silinder  
 Sumber : (Cengel, 2005)

$$R_{\text{cyl, conduction}} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \pi L k} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)} \quad (2.3)$$

Dimana :

$r_1$  = jari-jari dalam (m)

$r_2$  = jari-jari luar (m)

$L$  = panjang silinder (m)

$k$  = koefisien konduktivitas termal (W/m.K)

#### 2.4.1.1. Perpindahan Panas pada *Fin*

Kecepatan perpindahan panas dari permukaan pada temperatur  $T_s$  ke medium di sekelilingnya dinyatakan dengan Persamaan (2.4).

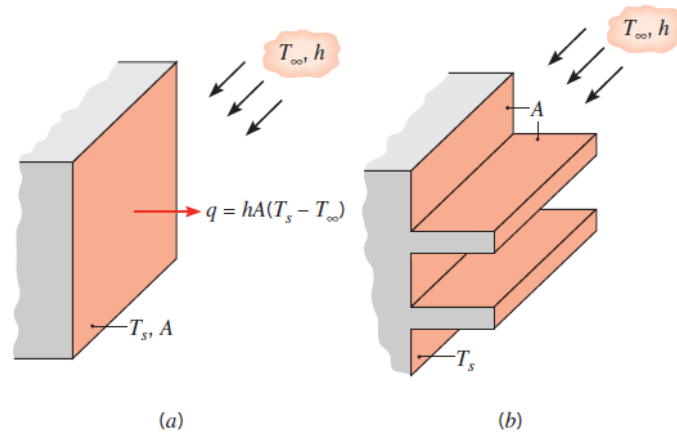
$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A_s (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

Dimana :  $A_s$  = luas permukaan perpindahan panas total

$h$  = koefisien konveksi

Ketika suhu  $T_s$  dan  $T_\infty$  ditetapkan oleh rancangan, ada dua cara untuk meningkatkan laju perpindahan panas: meningkatkan koefisien perpindahan panas konveksinya atau meningkatkan luas permukaannya. Meningkatkan harga  $h$

mungkin akan melibatkan pemasangan pompa ataupun kipas, atau mengganti kipas dan pompa dengan yang lebih besar, namun pendekatan ini mungkin sulit untuk dipraktekkan. Alternatif lain untuk meningkatkan laju perpindahan panas adalah dengan memperluas permukaan seperti pada Gambar 2.14 yaitu dengan memasang permukaan tambahan yang berupa *fin* (sirip) yang terbuat dari bahan dengan kemampuan konveksi tinggi seperti aluminium.

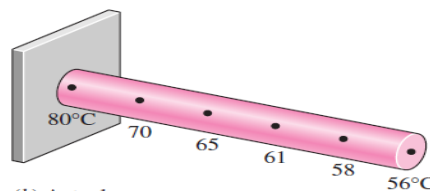


Gambar 2.14 (a) Permukaan Tanpa *Fin*, (b) Permukaan dengan *Fin*  
 Sumber : (Cengel, 2005)

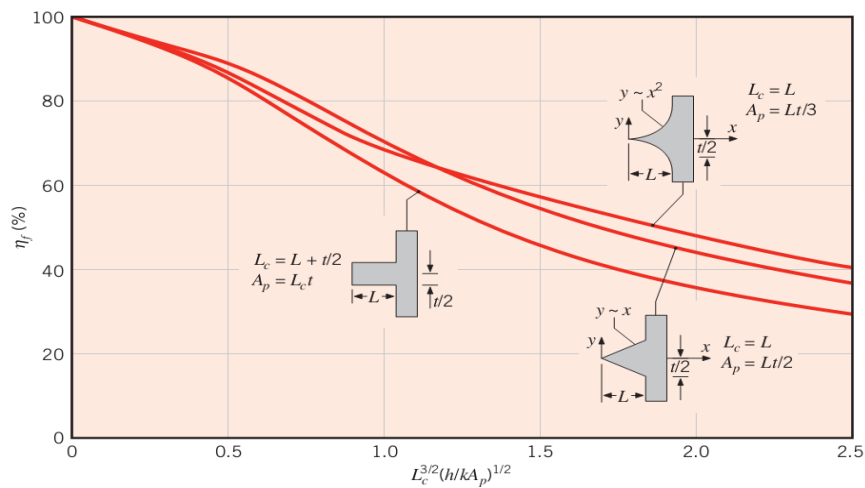
Pada Persamaan (2.4) yang dimaksud dengan  $A_s$  adalah gabungan dari permukaan yang memiliki *fin* dan tidak ada *fin*. Luas permukaan total didapatkan dengan persamaan (2.5) dimana  $N$  merupakan jumlah *fin*.

$$A_s = A_{\text{unfinned}} + N A_{\text{fin}} \quad (2.5)$$

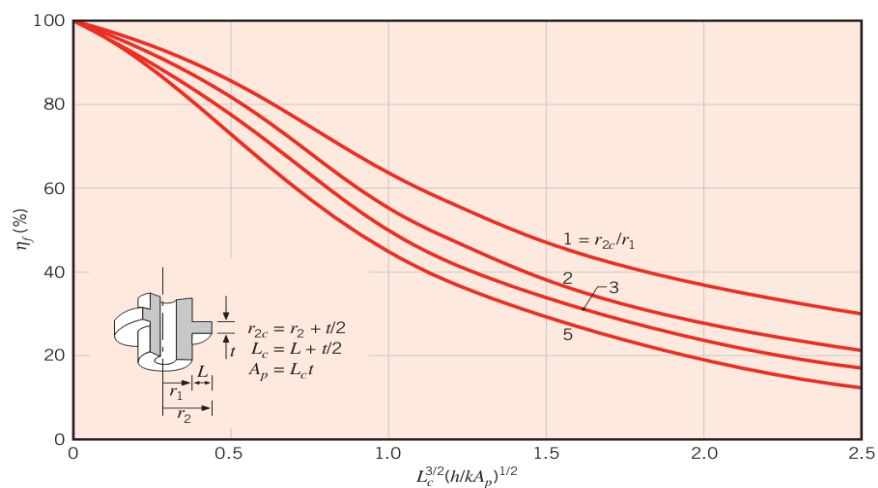
*Fin* diharapkan dapat meningkatkan laju perpindahan panas pada permukaan, tetapi pada kenyataannya suhu pada *fin* akan menurun di sepanjang permukaan seperti terlihat pada Gambar 2.15. Hal ini menyebabkan laju perpindahan panas dapat menurun seiring dengan penurunan suhu *fin* pada ujung permukaan *fin* tersebut. Untuk memperkirakan seberapa besar efek penurunan suhu pada *fin*, maka ditentukan sebuah efisiensi untuk *fin* sesuai dengan bentuk *fin* seperti pada Gambar 2.16 dan Gambar 2.17.



Gambar 2.15 Penurunan Suhu di Sepanjang Permukaan *Fin*  
 Sumber : (Cengel, 2005)



Gambar 2.16 Efisiensi *Fin* dengan Bentuk Tabung, Kotak dan Segitiga pada Permukaan Datar  
 Sumber : (Cengel, 2005)



Gambar 2.17 Efisiensi *Fin* dengan Bentuk Lingkaran pada Ketebalan yang Konstan  
 Sumber : (Cengel, 2005)

#### 2.4.2. Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan kalor melalui zat perantara yang mengalir atau bergerak. Pada umumnya konveksi dibagi menjadi dua yaitu alami dan paksa. Yang dimaksud dengan paksa dalam hal ini adalah adanya suatu tindakan yang disengaja untuk menciptakan aliran. Contoh sederhana untuk membuat konveksi paksa adalah dengan menambahkan *fan*.

Pada konveksi paksa terdapat aliran eksternal dan aliran internal. Kedua aliran tersebut memiliki cara yang berbeda dalam mendapatkan variabel *Nusselt Number*. Variabel tersebut dipengaruhi oleh *Reynold Number* yang merupakan parameter tanpa dimensi yang menentukan jenis aliran suatu fluida laminar atau turbulen. *Reynold Number* didapatkan melalui Persamaan (2.6a) atau (2.6b) sesuai dengan data yang diketahui.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.6)$$

$$Re = \frac{v D}{\nu}$$

Dimana :  $v$  = Kecepatan fluida (m/s)

$D$  = Diameter penampang pipa (m)

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $kg/m^3$ )

$\mu$  = Viskositas fluida ( $N.s/m^2$ )

$\nu$  = *Kinematic Viscosity* ( $m^2/s$ )

Kecepatan fluida sendiri dapat ditemukan dari Persamaan (2.7).

$$v = \frac{\dot{m}}{\rho A} \quad (2.7)$$

Dimana :  $\dot{m}$  = kecepatan aliran massa refrigerant (kg/s)

$\rho$  = Massa jenis fluida ( $kg/m^3$ )

$A$  = Luasan pipa ( $m^2$ )

Pada aliran eksternal, jika *Reynold Number* melebihi  $5 \times 10^5$  maka aliran tersebut turbulen. Jika dibawah nilai tersebut maka alirannya adalah laminar. Pada Persamaan (2.8) menunjukkan persamaan *Nusselt Number* untuk aliran laminar sedangkan Persamaan (2.9) menunjukkan persamaan untuk aliran turbulen.

$$\text{Laminar : } Nu = 0,664 Re^{0,5} Pr^{1/3} \quad (2.8)$$

$$\text{Turbulen : } Nu = 0,037 Re^{0,8} Pr^{1/3} \quad (2.9)$$

Pada aliran internal, jika nilai *Reynold Number* kurang dari 2300 maka aliran tersebut laminar dan persamaan *Nusselt Number* ditunjukkan oleh Persamaan (2.10). Jika antara 2300 sampai 4000 maka aliran tersebut dalam transisi dari laminar menjadi turbulen. Jika lebih besar dari 4000 maka aliran menjadi turbulen dan persamaan *Nusselt Number* ditunjukkan oleh Persamaan (2.11).

$$\text{Laminar : Constant Surface Heat Flux} \quad Nu = \frac{hD}{k} = 4,36 \quad (2.10)$$

$$\text{Constant Surface Temperature} \quad Nu = \frac{hD}{k} = 3,66$$

$$\text{Turbulen : } Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (2.11)$$

Dimana :  $n = 0,4$  untuk pemanasan

$n = 0,3$  untuk pendinginan

Setelah mendapatkan *Nusselt Number*, maka koefisien konveksi dapat dicari dengan Persamaan (2.12)

$$h = \frac{k}{D} Nu \quad (2.12)$$

Dimana :  $k$  = Konduktivitas termal fluida (W/m K)

## 2.5. Pengembunan

Pengembunan terjadi ketika suhu dari *vapor* menurun dibawah  $T_{sat}$  sehingga *vapor* berubah menjadi cairan. Kebanyakan pada proses refrigerasi dan pengkondisian udara banyak ditemui kondensasi pada permukaan dalam baik pipa horizontal maupun vertikal. Oleh karena itu perlu diperhatikan juga pengaruh kondensasi pada permukaan dalam pipa yang mempengaruhi koefisien konveksi. Menurut Cengel (2005), koefisien konveksi dapat dihitung dengan Persamaan (2.13).

$$h \text{ internal} = 0.555 \left[ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3}{\mu_l (T_{sat} - T_s)} \left\{ h_{fg} + \frac{3}{8} C_{pl} (T_{sat} - T_s) \right\} \right]^{1/4} \quad (2.13)$$

Dimana :  $g$  = Gaya gravitasi =  $9,81 \text{ m/s}^2$

$\rho_l$  = Massa jenis cairan ( $kg/m^3$ )

$\rho_v$  = Massa jenis gas ( $kg/m^3$ )

$k_l$  = Konduktivitas termal cairan (W/m K)

$\mu_l$  = Viskositas cairan (kg/m s)

$h_{fg} = h_g - h_f$  (J/kg)

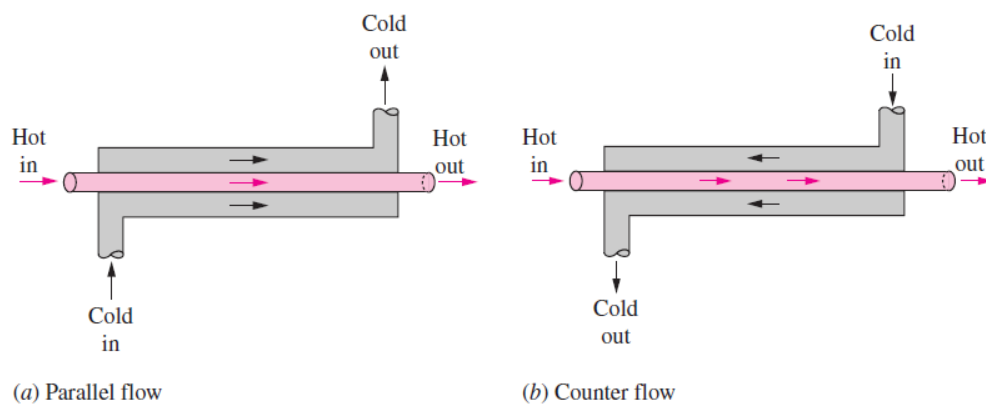
$C_{pl}$  = *Specific heat* cairan (J/kg °C)

## 2.6. Alat Penukar Panas

Menurut Cengel (2005), alat penukar panas (*heat exchanger*) adalah alat yang melakukan pertukaran panas antara dua fluida yang memiliki perbedaan suhu atau pertukaran panas antara dua fluida serta menjaga fluida-fluida tersebut agar tidak tercampur satu dengan lainnya.

Perpindahan panas pada alat penukar panas biasanya melibatkan konveksi pada masing-masing fluida dan konduksi di sepanjang dinding yang memisahkan kedua fluida tersebut. Laju perpindahan panas bergantung pada besarnya perbedaan suhu di lokasi tersebut, yang bervariasi sepanjang alat penukar panas.

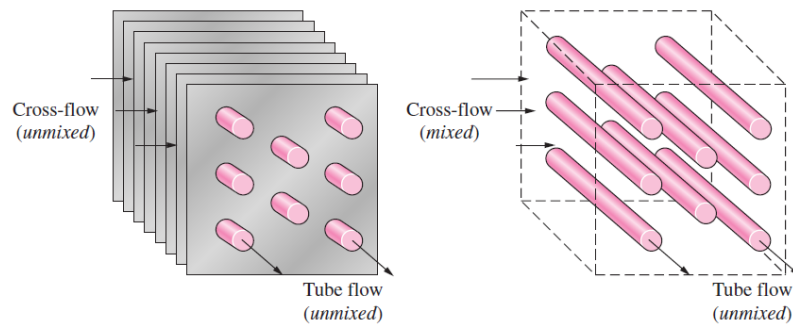
Pada alat penukar panas yang paling sederhana, terdapat dua pipa konsentris yang memiliki diameter yang berbeda. Fluida pertama bergerak di sepanjang pipa yang lebih kecil dan fluida kedua bergerak di sepanjang ruang antara pipa pertama dan pipa kedua. Terdapat dua aliran yang memungkinkan terjadi di dalam pipa, yaitu aliran searah (*parallel flow*) dan aliran berlawanan arah (*counter flow*) seperti pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Arah Aliran Alat Penukar Panas

Sumber : (Cengel, 2005)

Selain aliran searah dan berlawanan arah pada alat penukar panas yang kompak juga terdapat aliran dimana kedua fluida bergerak tegak lurus satu dengan lainnya. Aliran ini disebut *cross flow*. Aliran *cross flow* dibedakan menjadi campuran (*mixed*) dan tidak tercampur (*unmixed*) seperti Gambar 2.19.



Gambar 2.19 Aliran *Cross Flow*  
 Sumber : (Cengel, 2005)

Pembahasan alat penukar panas tidak lengkap bila tidak membahas *overall heat transfer coefficient* yang memiliki lambang U. Alat penukar panas yang melibatkan dua fluida dengan dipisahkan oleh dinding solid mengalami beberapa kali perpindahan panas. Panas pertama-tama dipindahkan dari fluida yang panas menuju dinding secara konveksi, kemudian melewati dinding secara konduksi dan dari dinding menuju fluida yang dingin secara konveksi lagi.

*Overall heat transfer coefficient* dinyatakan dengan Persamaan (2.14)

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.14)$$

Setelah menemukan U, laju perpindahan panas dapat ditemukan dengan Persamaan (2.14) seperti di bawah ini.

$$\dot{Q} = UA\Delta T \quad (2.15)$$

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, perubahan suhu antara fluida panas dan dingin bervariasi di sepanjang alat penukar panas, oleh karena itu lebih baik jika bisa memiliki rata-rata perbedaan suhu di dalam Persamaan (2.15). Di dalam bukunya, Cengel (2005) mengungkapkan persamaan untuk mendapatkan rata-rata perbedaan suhu yang disebutnya *log mean temperature difference*. Persamaan tersebut dapat dilihat pada Persamaan (2.16).

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 - \Delta T_2)} \quad (2.16)$$

Pada aliran *cross flow*, *log mean temperature difference* dikembangkan menjadi Persamaan (2.17)

$$\Delta T_{lm} = F \Delta T_{lm,CF} \quad (2.17)$$

Dimana  $F$  = Faktor koreksi (Gambar 2.21)

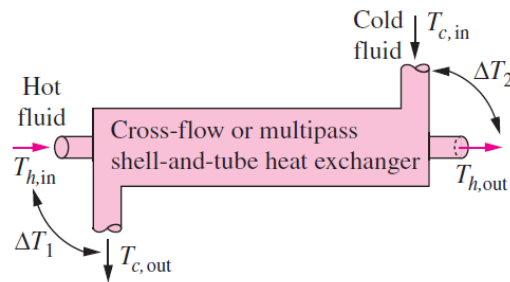
$T_1$  = Suhu fluida dingin masuk

$T_2$  = Suhu fluida dingin keluar

$t_1$  = Suhu fluida panas masuk

$t_2$  = Suhu fluida panas keluar

Gambar 2.20 menunjukkan skema aliran fluida beserta persamaan untuk menyelesaikan Persamaan (2.16).



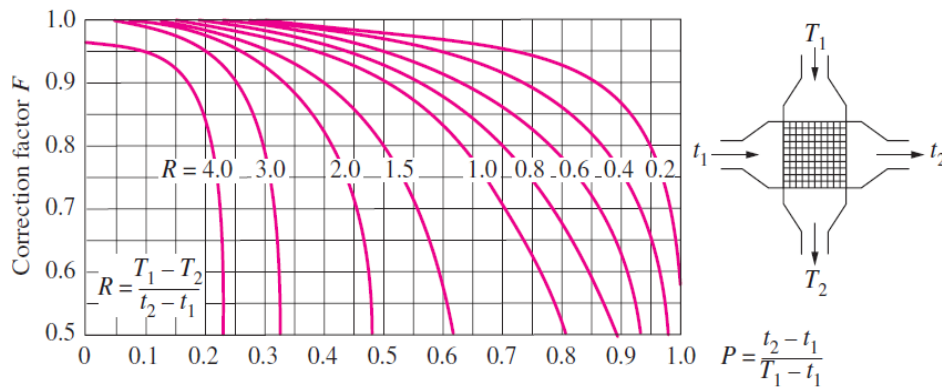
where

$$\Delta T_{lm,CF} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

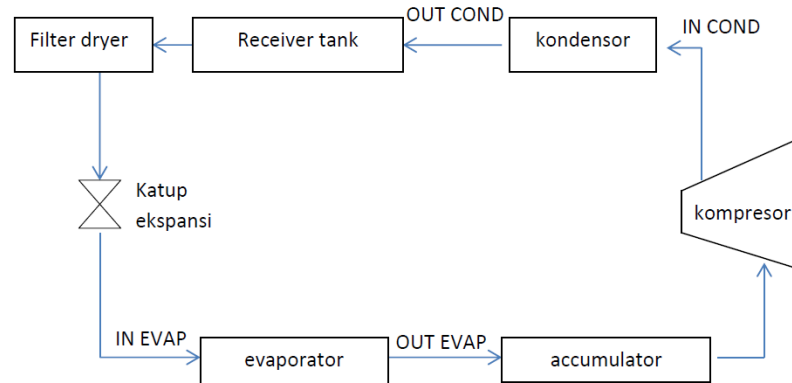
Gambar 2.20 Skema Aliran Fluida  
Sumber : Cengel (2005)



Gambar 2.21 Koreksi Faktor  
Sumber : Cengel (2005)

## 2.7. Studi Pustaka *Fast Chiller* Terdahulu

Pada subbab ini membahas *fast chiller* yang telah dibuat sebelumnya oleh Ellihu (2016). Skema *fast chiller* dapat dilihat pada Gambar 2.22. Pembahasan mengenai beban pada evaporator dan kondensor serta hasil percobaan pendinginan kuah kaldu terdahulu.



Gambar 2.22 Skema *Fast Chiller* Terdahulu  
Sumber : Ellihu (2016)

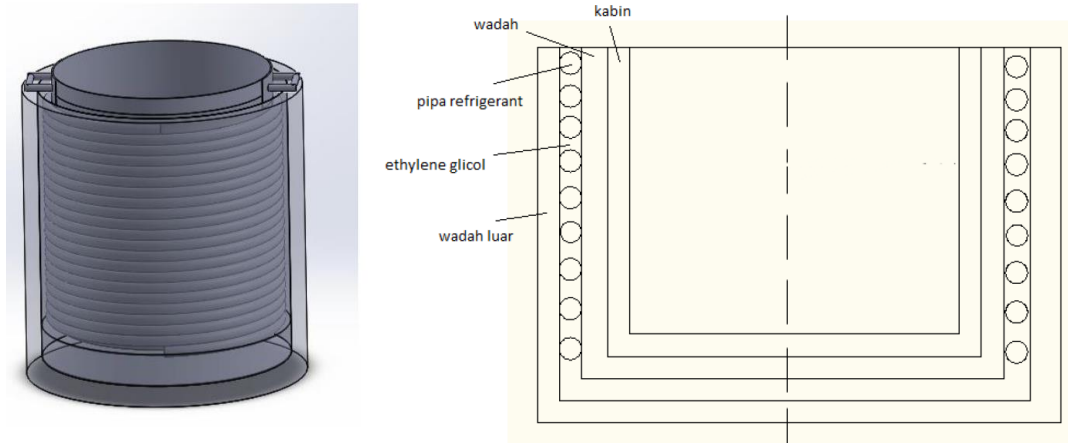
Beban pada evaporator didapatkan melalui data seperti berikut :

Volume kuah ( $V_{kuah}$ ) adalah 10 liter, massa jenis kuah ( $\rho_{kuah}$ ) adalah  $997 \text{ kg/m}^3$ , kalor jenis kuah ( $C_{p_{kuah}}$ ) adalah  $4.100 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$  (Rahman, 2009) dan massa kuah adalah 9,97 kg. Setelah mendapatkan data-data tersebut, didapatkan beban kuah untuk mendinginkan 10 liter kuah kaldu dari  $70^\circ\text{C}$  menjadi  $3^\circ\text{C}$  dalam waktu 75 menit sebesar 608 Watt.

Desain evaporator dapat dilihat pada Gambar 2.23 dimana kuah kaldu diletakkan pada kabin yang dilapisi oleh wadah yang dililit oleh pipa refrigerant. Kemudian dilakukan perhitungan beban pada evaporator dimana dalam kasus ini perpindahan panas yang terjadi adalah dari kuah kaldu ke refrigerant. Menurut Elia (2015), *safety factor* untuk sistem pendingin *fast chiller* sebesar 30% dari beban kuah kaldu. Beban pada evaporator adalah sebesar 791 Watt.

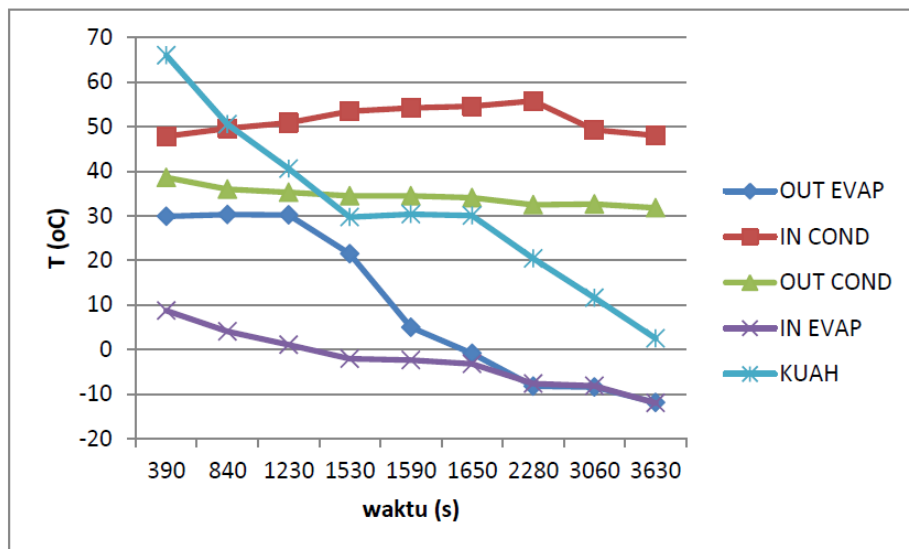
Pada perhitungan kondensor menggunakan data yang didapatkan melalui diagram P-h dan IRC Fluid *Property Calculator*. Berdasarkan kondisi nyata, kondensor menerima beban lebih saat pertama kali kuah kaldu didinginkan. Hal tersebut menyebabkan suhu refrigerant yang keluar dari evaporator lebih dari  $-10^\circ\text{C}$ . Dalam kondisi tersebut, fase refrigerant berupa uap superheat bersuhu

tinggi, sehingga kapasitas kondensor perlu diperbesar. Suhu refrigerant keluar dari evaporator pada awal proses ditentukan sebesar 50°C. Beban kalor yang dibuang ke lingkungan oleh kondensor adalah sebesar 3,01 kW.



Gambar 2.23 Desain Evaporator Terdahulu  
Sumber : Ellihu (2016)

Saat melakukan percobaan pendinginan kuah kaldu dari 70 ke 3°C, waktu yang dibutuhkan adalah 60,5 menit. Hasil uji coba pendinginan kuah kaldu terdahulu ditunjukkan oleh Gambar 2.24. *Pressure drop* terjadi pada kondensor sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 1.1.



Gambar 2.24 Hasil Uji Coba Pendinginan Kuah Kaldu Terdahulu  
Sumber :Ellihu (2016)

Kondensor yang digunakan terdapat pada Gambar 2.25 dengan tipe FN-11.5 berkapasitas 3,5 kW sesuai spesifikasi pada Tabel 2.1.



Gambar 2.25 Kondensor Terdahulu

FW standard type										
Model	Nominal capacity (kw)	heat transfer area (M2)	FW Motor				Connect dia (mm)		Overall (mm)	Install size (mm)
			Input(W)	OD(mm)	Air flow (m <sup>3</sup> /h)	Voltage(V)	Inlet	Outlet		
FW-2 (2x4)	0.6	2	1x35	200	410	220	Φ10	Φ10	320x100x230	270x65
FW-3.4 (3x4)	1	3.4	1x35	200	410	220	Φ12	Φ12	320x100x230	270x65
FW-4.4 (3x5)	1.3	4.4	1x60	250	750	220	Φ12	Φ12	370x100x280	325x65
FW-5.4 (3x6)	1.6	5.4	1x75	300	1350	220	Φ12	Φ12	440x100x330	392x65
FW-7.0 (4x6)	2	7	1x90	300	1350	220	Φ12	Φ12	440x135x330	390x90
FW-8.4 (3x8)	2.3	8.4	1x150	350	3100	220/380	Φ16	Φ12	500x130x430	455x95
FW-11.5 (4x8)	3.5	11.5	1x150	350	3100	220/380	Φ16	Φ12	480x180x430	430x145
FW-15 (4x8)	4.4	15	1x150	350	3100	220/380	Φ16	Φ12	550x180x480	490x145
FW-18 (4x10)	5.2	18	1x180	400	4500	220/380	Φ19	Φ16	590x180x530	530x140
FW-22 (5x10)	6.4	22	1x180	400	4500	220/380	Φ19	Φ16	590x180x530	530x140
FW-25 (4x11)	8.1	25	1x180	400	4500	380	Φ19	Φ16	750x180x680	660x150
FW-28 (4x8)	8.2	28	2x150	350	6200	220/380	Φ19	Φ16	900x180x430	840x145

Tabel 2.1 Spesifikasi Kondensator Terdahulu

Sumber : [http://www.tianycocool.cn/products\\_detail/productId=39.html](http://www.tianycocool.cn/products_detail/productId=39.html)