

## 2. TEORI DASAR

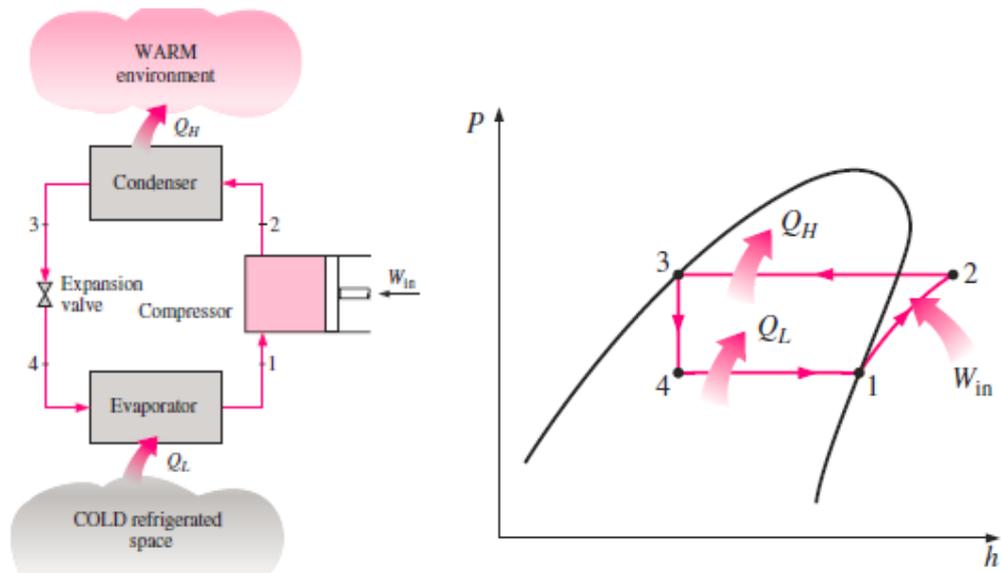
### 2.1. Sistem Refrigerasi

Mesin pendingin adalah suatu mesin konversi energi yang menggunakan siklus tertentu untuk menyerap kalor dari substansi yang ingin didinginkan. Beberapa macam siklus yang sering digunakan sebagai sistem pendingin suatu mesin adalah siklus kompresi uap ideal, siklus refrigerasi absorpsi, siklus pendingin Cascade, siklus gas Linde-Hampson, siklus refrigerasi gas, termoelektrik, dll. (Cengel,2005)

#### 2.1.1. Siklus Kompresi Uap Ideal

Siklus pendingin kompresi uap ideal merupakan siklus yang paling sering diaplikasikan pada mesin pendingin dikarenakan siklus ini cukup sederhana dan kapasitas pendinginan atau *Coefficient of Performance* (COP) yang didapatkan juga cukup baik. Menurut Cengel (2006) dan Incropera (2011), siklus ini terdiri dari empat komponen utama, yaitu:

1. Evaporator, merupakan komponen yang menjadi tempat refrigerant menyerap panas dari udara dalam ruangan.
2. Kompresor, merupakan komponen yang menaikkan tekanan refrigerant.
3. Kondensor, merupakan komponen yang membuang panas dari refrigerant ke udara sekeliling.
4. Katup ekspansi, merupakan komponen yang menurunkan tekanan refrigerant sehingga temperatur refrigerant menjadi turun.



Gambar 2.1 Diagram blok dan P-h dari siklus pendingin kompresi uap ideal

Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

Prinsip kerja siklus ini berjalan seperti yang ditunjukkan oleh diagram blok dan diagram P-h pada gambar 2.1. Langkah pertama dimulai dari titik 1 dimana refrigerant yang memiliki fase uap jenuh mendapatkan kerja dari kompresor sehingga tekanan pada refrigerant menjadi naik dan temperatur refrigerant ikut naik seiring dengan naiknya tekanan.

Pada tahap ini fase dari refrigerant menjadi *superheated vapor* seperti yang terlihat pada titik 2. Setelah refrigerant keluar dari kompresor, refrigerant memasuki kondensor. Pada kondensor, refrigerant melepas kalor ke lingkungan. Akibat dari pelepasan sejumlah kalor tersebut ke udara pada kondensor menyebabkan refrigerant berkondensasi menjadi cair kembali.

Pada titik 3 ditunjukkan bahwa fase refrigerant ketika keluar dari kondensor yaitu cair jenuh dan tetap dalam tekanan yang tinggi. Kemudian refrigerant memasuki alat ekspansi. Alat ekspansi pada umumnya dapat berupa sebuah katup atau pipa kapiler. Prinsip kerja keduanya sama, yaitu mengekspansi fluida yang melalui alat ekspansi sehingga tekanan fluida tersebut menjadi turun secara drastis dengan cepat. Tujuan dari penurunan tekanan secara cepat ini agar refrigerant menjadi dingin kembali karena temperatur refrigerant menjadi turun seiring dengan turunnya tekanan.

Pada titik 4 ditunjukkan bahwa tekanan refrigerant menurun setelah melewati alat ekspansi dengan fase *mixture* (campuran antara cair dan uap). Pada kondisi tersebut, refrigerant siap memasuki evaporator untuk menyerap kalor pada substansi. Selanjutnya siklus ini berjalan berulang secara terus-menerus.

## **2.2. Blast Chiller**

*Blast chiller* merupakan salah satu jenis mesin pendingin dimana proses pendinginan dapat dilakukan dalam waktu yang relatif singkat. Proses pendinginan yang cepat ini menyebabkan kapasitas pendinginan *blast chiller* menjadi lebih tinggi daripada mesin pendingin biasa untuk beban produk/makanan yang sama. Kebanyakan mesin pendingin seperti lemari es dan *air conditioning* yang banyak dipakai di rumah bekerja dengan siklus pendingin kompresi uap. Siklus pendingin ini banyak digunakan karena sederhana dan kompak. Siklus tersebut juga banyak diterapkan pada mesin *blast chiller*.

Menurut ASHRAE (2012), siklus pendingin kompresi uap terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu evaporator, kompresor, kondensor, dan alat ekspansi.

Mengenai komponen-komponen dari *blast chiller* yang digunakan akan dijelaskan lebih rinci sebagai berikut.

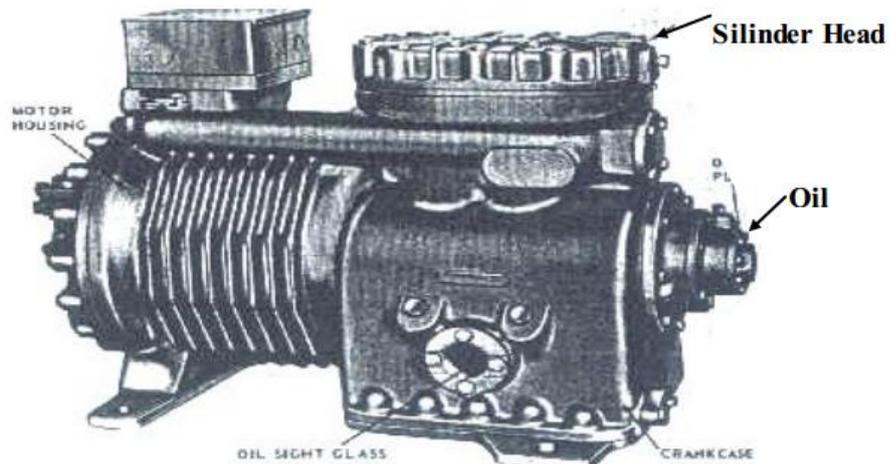
### **2.2.1. Kompresor**

Kompresor adalah alat mekanik yang berfungsi untuk meningkatkan tekanan fluida. Kompresor biasanya menggunakan motor listrik, mesin diesel atau mesin bensin sebagai tenaga penggerak. Fluida bertekanan hasil dari kompresor biasanya diaplikasikan atau digunakan pada pengecatan dengan teknik *spray/air brush*, untuk mengisi angin ban, pembersihan, pneumatik, dsb. Jenis kompresor berdasarkan temperatur kerja ada 3, yaitu kompresor *low*, *medium*, dan *high temperature*. Penentuan kompresor disesuaikan dengan kebutuhan penggunaan. Kompresor *high temperature* digunakan pada temperatur kerja kompresor yang tinggi karena apabila kompresor biasa (jenis *low* atau *medium temperature*) dipaksa bekerja di temperatur tinggi, maka lama-kelamaan

kompresor akan menjadi *overheat* dan akan mati. Dalam jangka panjang kompresor akan menjadi tidak awet.

### 2.2.1.1. Kompresor Semi Hermetik

Pada kompresor semi hermetik, poros engkol dari kompresor menjadi satu dengan motor listriknya. Kelebihan kompresor semi-hermetik ini adalah bagian-bagian penutup dan penyambungannya masih bisa dibuka tanpa dirusak. Rumah kompresor terbuat dari besi tuang, bagian-bagian penutup dan penyambungannya masih dapat dibuka. Kompresor semi hermetik ditunjukkan pada gambar 2.2.



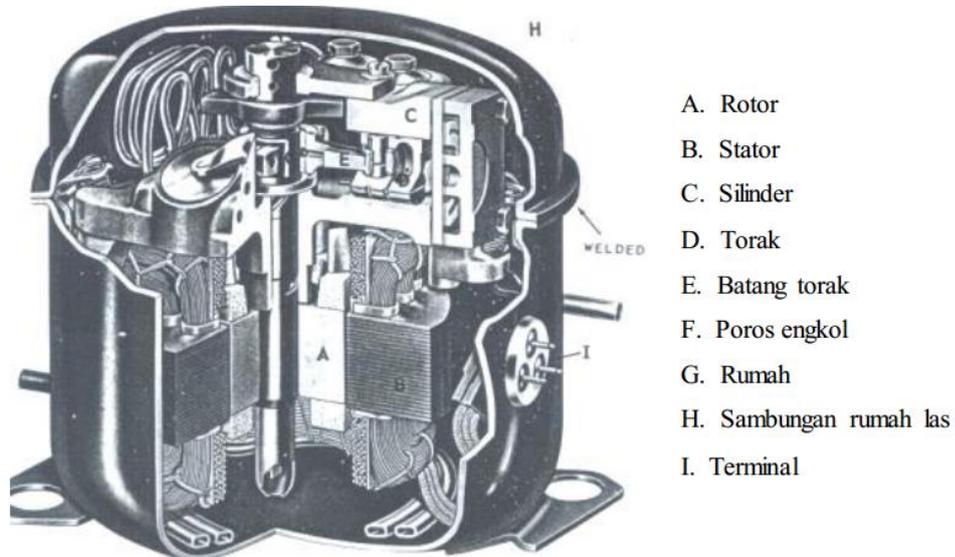
Gambar 2.2 Kompresor semi hermetik

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

### 2.2.1.2. Kompresor Hermetik

Pada dasarnya, kompresor hermetik hampir sama dengan semi-hermetik, perbedaannya hanya terletak pada cara penyambungan rumah (baja) kompresor dengan stator motor penggerakannya. Kelebihan kompresor hermetik adalah rumah kompresor dipergunakan sambungan las sehingga kedap udara dari luar, sehingga kompresor hermetik mampu digunakan pada area yang berdebu. Bentuk

kompresor hermetik relative lebih kecil dibandingkan dengan kompresor hermetik sehingga cocok untuk penggunaan skala kecil (rumah tangga, restoran, atau komersial). Rumah kompresor dibuat dari baja dengan pengerjaan las, sehingga baik kompresor maupun motor listriknya tak dapat diperiksa tanpa memotong rumah kompresor. Kompresor hermetik ditunjukkan pada gambar 2.3.



Gambar 2.3 Kompresor hermetik

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

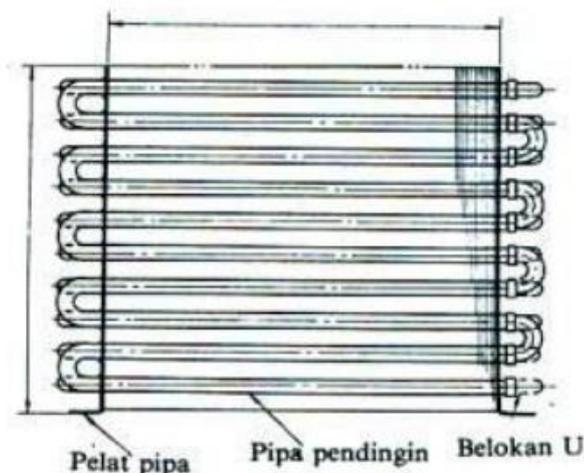
## 2.2.2. Kondensor

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 (yang keluar dari kompresor) diperlukan usaha untuk melepaskan kalor dengan cara mendinginkan uap refrigerant tersebut. 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

Udara yang mendinginkan kondensor dapat mengalir karena aliran udara secara alamiah atau aliran udara yang ditiupkan oleh *fan motor*. Mesin refrigerasi

yang kecil seperti lemari es memakai kondensor dengan pendinginan udara secara alamiah yang disebut dengan kondensor statis, sedangkan lemari es yang lebih besar dan berbagai jenis mesin refrigerasi seperti *AC window*, *AC split* dan sebagainya menggunakan kondensor dengan *fan motor*. *Fan motor* dapat meniupkan udara ke arah kondensor dalam jumlah yang lebih besar sehingga kapasitas kondensor bertambah. Bagian-bagian kondensor berpendingin udara ditunjukkan pada gambar 2.4.



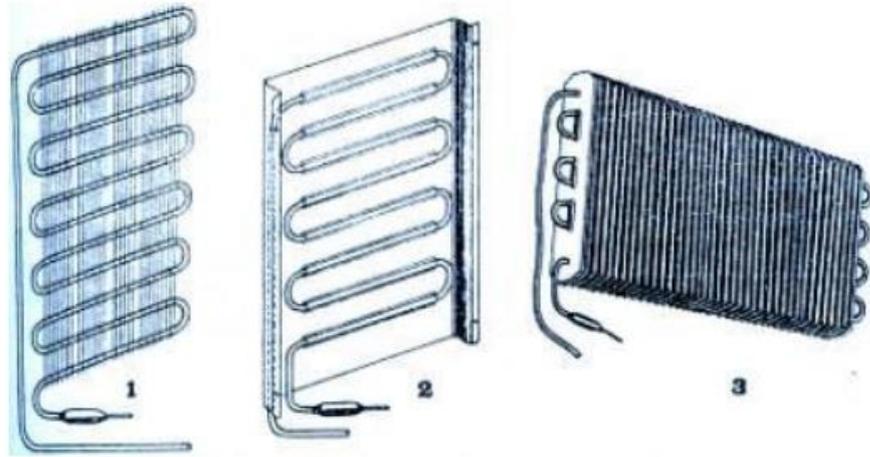
Gambar 2.4 Kondensor berpendingin udara

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

Menurut Miller (2006), sirip dari pipa pendingin mempunyai jarak antara 20 – 35 mm. Diameter luar dari pipa pendingin yang biasa dipergunakan adalah 19,5 mm dan tebalnya 0,6 – 1,2 mm (0,5 untuk pipa kecil). Kecepatan udara yang mengalir melalui bidang pendingin kira-kira 2,5 m/s dengan luas bidang pendinginan yang diperluka per ton refrigerasi kira-kira 12 s/d 15 m<sup>2</sup>. Menurut Budiman (2015), temperatur pengembunan refrigerant kira-kira 10°C – 20°C lebih tinggi dari temperatur atmosfer.

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. Bentuk atau konstruksi kondensor statis ada tiga macam (gambar 2.5) yaitu :

- a. Pipa dengan jari-jari penguat (*wire and tube condensor*)
- b. Pipa dengan pelat besi (*plat type condensor*)
- c. Pipa dengan sirip-sirip (*tube and fins condensor*)



1-Pipa dengan jari-jari penguat    2-Pipa dengan pelat besi    3-Pipa dengan sirip-sirip

Gambar 2.5 Jenis konstruksi kondensator statis

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

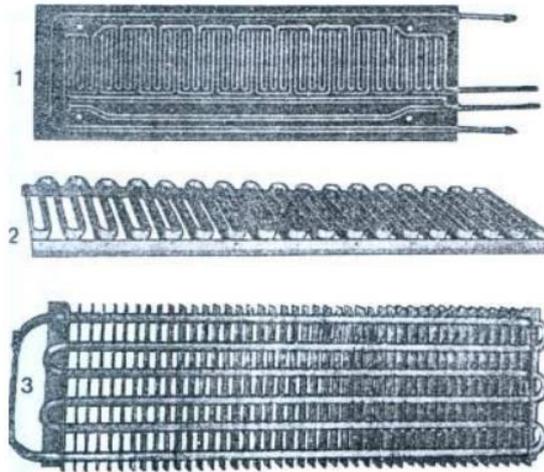
Kondensator pendinginan udara dengan *fan motor* terdiri dari *coil* pipa pendingin bersirip plat (pipa tembaga dengan sirip aluminium, atau pipa tembaga dengan sirip tembaga). Udara mengalir dengan arah tegak lurus pada bidang pendingin. Gas refrigerant yang bertemperatur tinggi masuk ke bagian atas dari *coil* dan secara berangsur-angsur mencair dalam alirannya ke bagian bawah *coil*.

### 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 kondensator. Hanya saja di dalam kondensator, panas dilepas atau dibuang oleh refrigerant ke media pendingin kondensator sedangkan di dalam evaporator kalor diserap oleh refrigerant dari media yang

didinginkan. Konstruksi evaporator kering untuk lemari es ada tiga macam (gambar 2.6) yaitu:

1. Permukaan datar (*plate surface*)
2. Pipa (*bare tube*)
3. Pipa dengan sirip (*finned tube*)



Gambar 2.6 Evaporator kering

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

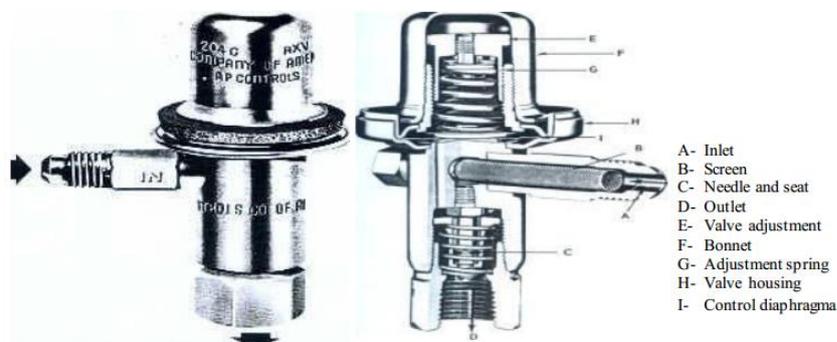
Kelebihan pada evaporator jenis *bare tube* yaitu pipa dapat ditebuk atau dibentuk mengikuti bentuk kabin penyimpanan makanan. Dari segi laju perpindahan panas, evaporator jenis *finned tube* lebih baik karena sirip-sirip pada pipa evaporator dapat meningkatkan laju perpindahan panas.

#### 2.2.4. Katup Ekspansi

Katup ekspansi dipergunakan untuk mengekspansi secara adiabatik cairan refrigerant yang bertekanan dan bertemperatur tinggi sampai mencapai kondisi tekanan dan temperatur rendah pada entalpi konstan. Selain itu katup ekspansi mengatur pemasukan debit refrigerant sesuai dengan beban pendinginan yang harus dilayani oleh evaporator.

Ada beberapa jenis katup ekspansi yang sering digunakan antara lain: katup ekspansi otomatis dan katup ekspansi *thermostatic*. Bagian-bagian katup

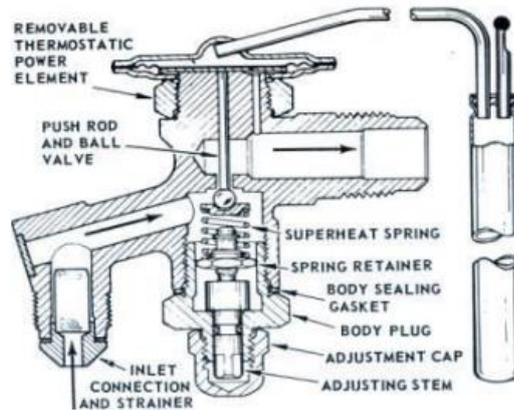
ekspansi otomatis ditunjukkan pada gambar 2.7. Katup ekspansi otomatis ini bekerja berdasarkan tekanan yang seimbang pada diafragma dari dua tekanan yang berlawanan dan saling mengimbangi. Tekanan yang berlawanan tersebut terdiri dari tekanan evaporator dan tekanan pegas. Tekanan evaporator menekan diafragma ke atas, membuat lubang saluran menutup. Tekanan pegas yang dapat diatur menekan diafragma pada arah yang berlawanan, membuat lubang saluran membuka. Katup ini akan bekerja secara otomatis yaitu mengatur jumlah refrigerant yang mengalir ke evaporator untuk membuat tekanan evaporator dan tekanan pegas dalam keadaan seimbang atau konstan.



Gambar 2.7 Katup ekspansi otomatis

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

Bagian-bagian katup ekspansi *thermostatic* ditunjukkan pada gambar 2.8. Pada katup ekspansi *thermostatic*, 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 dari bagian atas diafragma ke bagian bawah untuk membuka lubang katup. Tekanan di bagian bawah diafragma menekan ke atas untuk menutup lubang katup.



Gambar 2.8 Katup ekspansi *thermostatic*

Sumber : <http://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

### 2.2.5. *Filter Dryer*

*Filter dryer* adalah sebuah komponen tambahan pada suatu sistem pendingin (gambar 2.9). 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 2.9 *Filter Dryer*

Sumber : [gzhuaya.company.weiku.com](http://gzhuaya.company.weiku.com)

### 2.2.6. *Receiver Tank*

Menurut ASHRAE (2012), *receiver tank* (gambar 2.10) 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 2.10 *Receiver tank*

Sumber : [www.ecvv.com](http://www.ecvv.com)

### 2.2.7. *Accumulator*

Menurut ASHRAE (2012), *accumulator* adalah komponen tambahan pada sistem pendingin yang berfungsi untuk memisahkan fase gas dengan fase cair refrigerant sebelum masuk kompresor (gambar 2.11).



Gambar 2.11 *Accumulator*

Sumber : [www.directindustry.com](http://www.directindustry.com)

### 2.2.8. Refrigerant

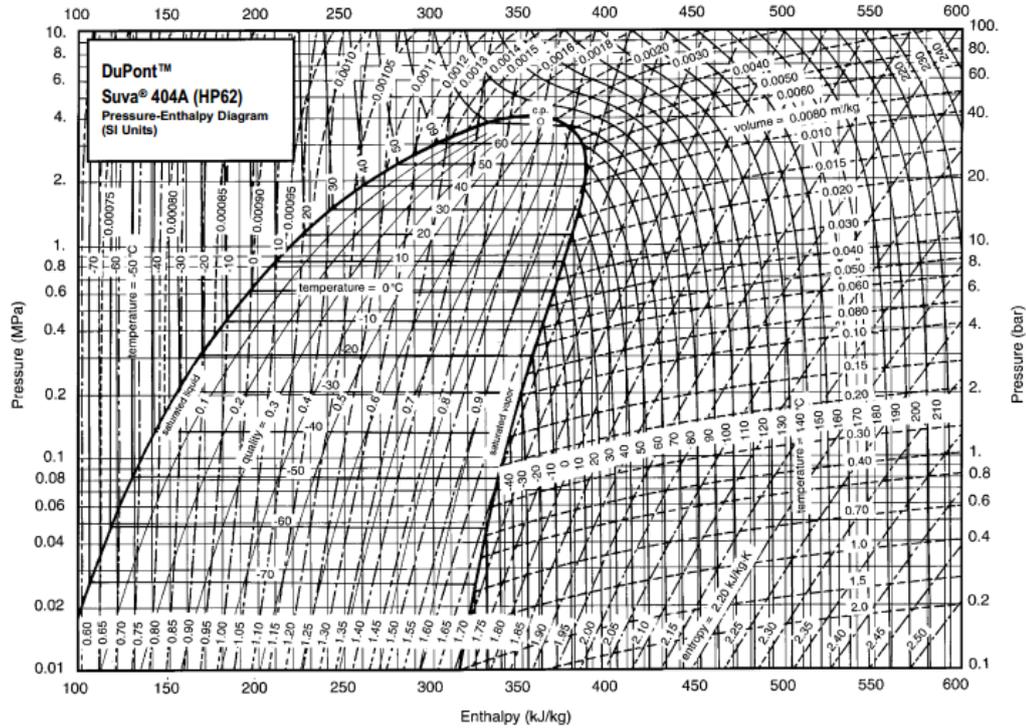
Menurut Miller (2006), refrigerant adalah suatu fluida kerja yang digunakan sebagai media penghantar kalor. Refrigerant berperan untuk menyerap kalor dalam substansi atau ruangan yang ingin didinginkan pada tekanan dan temperatur rendah, kemudian membuang kalor tersebut ke lingkungan pada tekanan dan 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, karakteristik berbahaya dari refrigerant adalah dapat terbakar. Menurut Ananthanarayanan (2013), berdasarkan alasan ini maka refrigerant diklasifikasikan dengan standard 34-2007 sebagai berikut:

- A1 : sifat racun rendah dan tidak terbakar
- A2 : sifat racun rendah dan sifat terbakar rendah
- A3 : sifat racun rendah dan mudah terbakar
- B1 : sifat racun lebih tinggi dan tidak terbakar
- B2 : sifat racun lebih tinggi dan sifat terbakar rendah
- B3 : sifat racun lebih tinggi dan mudah terbakar

#### 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. Diagram P-h refrigerant R-404a ditunjukkan pada gambar 2.26.



Gambar 2.12 Diagram tekanan-entalpi R-404a

### 2.3. Hukum Termodinamika Pertama

Menurut Cengel (2006), 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*, maka 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 berikut :

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

Ketika perubahan energi kinetik dan potensial diabaikan maka persamaan keseimbangan energi menjadi :

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}(h_{\text{out}} - h_{\text{in}}) \quad (2.1)$$

Dimana :

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

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

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

$h_{\text{out}}$  = entalpi fluida pada keluaran (kJ/kg)

$h_{\text{in}}$  = entalpi fluida pada masukan (kJ/kg)

## 2.4. Dasar Perhitungan Mesin Pendingin

Dalam merancang suatu mesin pendingin, diperlukan adanya beberapa teori perhitungan agar kebutuhan akan dibuatnya mesin pendingin tersebut dapat tercapai. Perhitungan siklus kompresi uap ideal berdasarkan pada data-data dari diagram dan tabel temperatur (T) dengan entropi (s) dan tekanan (P) dengan entalpi (h).

### 2.4.1. Efek Refrigerasi (ER)

Efek refrigerasi (ER) adalah sejumlah kalor yang berpindah dari sistem ke lingkungan. Efek refrigerasi adalah parameter penting karena merupakan efek yang ingin dicapai dengan sistem mesin pendingin. Semakin besar efek refrigerasi, semakin baik kinerja sistem tersebut. Besar efek refrigerasi dinyatakan dalam persamaan (2.2).

$$ER = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.2)$$

Dimana :

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

$h_1$  = entalpi refrigerant yang keluar evaporator (kJ/kg)

$h_4$  = entalpi refrigerant yang masuk evaporator (kJ/kg)

#### 2.4.2. Kerja Kompresi ( $\dot{W}_k$ )

Besarnya kerja kompresi ( $\dot{W}_k$ ) adalah selisih entalpi refrigerant yang keluar dari kompresor dengan entalpi refrigerant yang masuk ke kompresor. Besar kerja kompresi dinyatakan dalam persamaan (2.3).

$$\dot{W}_k = \dot{m}(h_2 - h_1) \text{ (kW)} \quad (2.3)$$

Dimana :

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

$h_1$  = entalpi refrigerant yang masuk kompresor (kJ/kg)

$h_2$  = entalpi refrigerant yang keluar kompresor (kJ/kg)

Pada proses kompresi adiabatik reversible, perubahan energi kinetik dan energi potensial diabaikan.

#### 2.4.3. Kalor yang Dilepaskan Kondensor ( $\dot{Q}_{kondensor}$ )

Refrigerant bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi akibat dari kompresi dari kompresor masuk ke dalam kondensor untuk melepas kalor yang dibawa dari evaporator ke lingkungan. Besar kalor per satuan massa refrigerant yang dilepaskan oleh kondensor dinyatakan dalam persamaan (2.4).

$$\dot{Q}_{kondensor} = \dot{m}(h_2 - h_3) \text{ (kW)} \quad (2.4)$$

Dimana :

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

$h_2$  = entalpi refrigerant yang masuk ke kondensor (kJ/kg)

$h_3$  = entalpi refrigerant yang keluar dari kondensor (kJ/kg)

#### 2.4.4. Kalor yang Diserap Evaporator ( $\dot{Q}_{evap}$ )

Di dalam evaporator, kalor yang diserap berlangsung secara isobar (tekanan konstan). Kalor dari substansi diserap oleh refrigerant bertekanan rendah dan bersuhu rendah yang dilewatkan melalui pipa tembaga (*coil*) yang dililitkan

pada kabin evaporator. Kondisi refrigerant saat masuk evaporator adalah campuran cair dan uap, kemudian menjadi uap sepenuhnya saat keluar evaporator. Besar kalor yang diserap oleh evaporator dinyatakan dalam persamaan (2.5).

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (\text{kW}) \quad (2.5)$$

Dimana :

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

$h_1$  = entalpi refrigerant yang keluar dari evaporator (kJ/kg)

$h_4$  = entalpi refrigerant yang masuk ke evaporator (kJ/kg)

#### 2.4.5. Penurunan Suhu dan Tekanan pada Katup Ekspansi

Proses ekspansi ini berlangsung secara isoentalpi, yang artinya tidak terjadi perubahan entalpi selama proses ekspansi berlangsung (2.6).

$$h_3 = h_4 \quad (2.6)$$

Dimana :

$h_3$  = entalpi refrigerant saat masuk ke katup ekspansi (kJ/kg)

$h_4$  = entalpi refrigerant saat keluar dari katup ekspansi (kJ/kg)

#### 2.4.6. Koefisien Peformasi (COP)

Koefisien peformasi merupakan perbandingan antara kapasitas refrigerasi dengan kerja kompresi yang dibutuhkan. Semakin besar nilai COP maka semakin baik kinerja sistem refrigerasi tersebut. Besar COP dinyatakan dalam persamaan (2.7).

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}}{W_{\text{kompresor}}} \quad (2.7)$$

Dimana :

$W_{\text{kompresor}}$  = daya yang dibutuhkan kompresor (W)

$$\dot{Q} = \text{beban pendinginan (W)}$$

## 2.5. Metode Perpindahan Panas

Perpindahan panas dapat terjadi saat terdapat perbedaan suhu. Kalor akan mengalir dari suhu tinggi ke suhu rendah. Dalam sistem pendingin pada umumnya ada beberapa cara perpindahan kalor, yaitu :

### 2.5.1. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana kalor berpindah melalui suatu media yang diam di tempat/media tidak bergerak. Flux panas ( $q_x$ ) konduksi ditentukan dengan persamaan Fourier's Law (2.8).

$$q_x = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{R_{\text{termal}}} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.8)$$

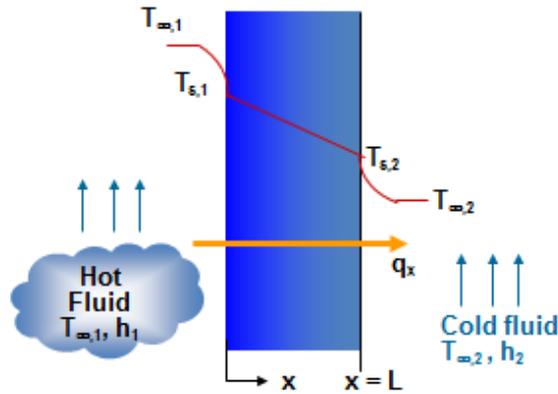
Dimana :

$T_{s,1}$  = temperatur permukaan 1 (K)

$T_{s,2}$  = temperatur permukaan 2 (K)

$R_{\text{termal}}$  = tahanan konduksi termal

Jika sistem media perpindahan panas konduksi secara linier maka besar tahanan konduksi termal ( $R_{\text{conduction}}$ ) dinyatakan dalam persamaan (2.9). Gambar 2.13 menunjukkan proses perpindahan panas konduksi dengan sistem linier.



Gambar 2.13 Konduksi sistem linier

Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

$$R_{conduction} = \frac{L}{kA} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2.9)$$

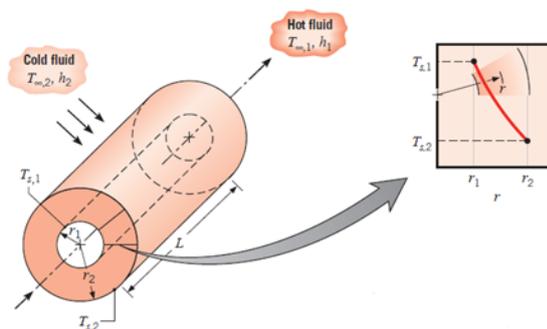
Dimana :

$L$  = tebal material media perpindahan panas (m)

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

$A$  = luas permukaan yang mengalami kontak perpindahan panas ( $\text{m}^2$ )

Apabila sistem menjadi silinder maka besar tahanan konduksi termal silinder ( $R_{cyl,conduction}$ ) dinyatakan dalam persamaan (2.10). Gambar 2.14 menunjukkan proses perpindahan panas konduksi dengan sistem silinder.



Gambar 2.14 Konduksi sistem silinder

Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

$$R_{cyl,conduction} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad (\text{W/m}^2.\text{K}) \quad (2.10)$$

Dimana :

$r_1$  = jari-jari dalam (m)

$r_2$  = jari-jari luar (m)

$L$  = panjang silinder (m)

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

## 2.5.2. Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui media penghantar panas yang mengalir/bergerak. Media tersebut mengalir/bergerak dapat disebabkan oleh 2 faktor, yaitu secara alami dan secara paksa. Maka dari itu konveksi dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu konveksi alami dan konveksi paksa. Laju perpindahan panas yang terjadi secara konveksi ( $q''$ ) secara umum dapat dituliskan dengan persamaan (2.11).

$$q'' = h(T_1 - T_2) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.11)$$

Dimana :

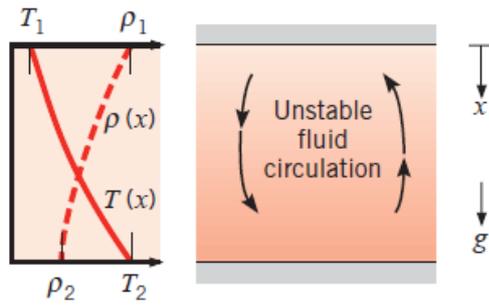
$T_1$  = temperatur fluida 1 (K)

$T_2$  = temperatur fluida/permukaan benda 2 (K)

$h$  = koefisien konveksi termal (W/m<sup>2</sup>.K)

### 2.5.2.1. Konveksi Alami

Konveksi alami terjadi akibat pengaruh dari efek *Bouyancy*. Efek *Bouyancy* terjadi akibat perbedaan kepadatan fluida yang berkaitan dengan temperatur. Fluida dengan temperatur lebih tinggi akan bergerak mengalir ke atas karena memiliki kepadatan yang lebih rendah, sehingga apabila hal ini berlangsung secara terus-menerus maka terjadi efek aliran fluida seperti putaran dari bawah ke atas (gambar 2.15).



Gambar 2.15 Aliran konveksi alami

Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

Besar perpindahan panas secara konveksi alami secara umum dapat ditulis dengan persamaan konveksi secara umum seperti di atas. Pada konveksi alami terdapat variabel *Grashof number*. *Grashof number* merupakan suatu besaran tanpa dimensi yang menjadi variabel dalam menghitung *Rayleigh number*. *Grashof number* (Gr) dapat dihitung dengan persamaan (2.12).

$$\mathbf{Gr} = \left| \frac{\beta \times g \times (T_s - T_\infty) \times L_c^3}{\nu^2} \right| \quad (2.12)$$

Dimana :

$\beta$  = koefisien ekspansi volume

$g$  = gravitasi bumi ( $m/s^2$ )

$T_s$  = temperatur permukaan (K)

$T_\infty$  = temperatur udara lingkungan (K)

$L_c$  = panjang karakteristik benda (m)

$\nu$  = viskositas kinematic fluida ( $m^2/s$ )

Koefisien ekspansi volume ( $\beta$ ) untuk gas ideal dapat dihitung dengan persamaan (2.13).

$$\beta = \frac{1}{T_f} \quad (2.13)$$

Dimana :

$T_f$  = temperatur rata-rata udara lingkungan dan permukaan benda (K)

Kemudian untuk mencari *Rayleigh number* (Ra) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.14).

$$\mathbf{Ra = Gr \times Pr} \quad (2.14)$$

Dimana :

$Gr = \textit{Grashof number}$

$Pr = \textit{Prandtl number}$

Tabel 2.1 menunjukkan korelasi untuk mencari *Nusselt number* pada konveksi alami masing-masing bentuk benda.



### 2.5.2.2. Konveksi Paksa

Konveksi paksa terjadi akibat dari suatu tindakan yang disengaja untuk menciptakan aliran. Konveksi paksa ini biasanya bertujuan untuk meningkatkan turbulensi suatu aliran supaya perpindahan panas yang terjadi semakin baik. Cara untuk menghasilkan konveksi paksa ada bermacam-macam, yaitu dengan menggunakan *fan*, *propeller*, pengaduk, turbin, dsb. Besar perpindahan panas secara konveksi paksa sama seperti perpindahan panas konveksi pada umumnya. Hanya saja ada perbedaan dalam mencari koefisien konveksi dimana di dalamnya terdapat variabel *Reynold number* dan *Nusselt number*. Menurut Prithcard (2011), besar *Reynold number* (Re) untuk aliran internal dinyatakan dalam persamaan (2.15).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.15)$$

Dimana :

$\rho$  = massa jenis fluida (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = kecepatan fluida (m/s)

$D$  = diameter penampang saluran (m<sup>2</sup>)

$\mu$  = viskositas fluida (N.s/m<sup>2</sup>)

*Reynold number* merupakan parameter tanpa dimensi untuk menentukan jenis aliran suatu fluida laminar atau turbulen. Apabila nilai *Reynold number* lebih kecil dari 2300 maka aliran tersebut laminar, jika antara 2300 sampai 4000 maka aliran tersebut transisi laminar menjadi turbulen, jika lebih besar dari 4000 maka aliran turbulen sepenuhnya.

Menurut Winoto (1998), pada mesin pengaduk terdapat hubungan antara putaran pengaduk dengan *Reynold number* (Re) objek yang diaduk. Hubungan tersebut dinyatakan dalam persamaan (2.16).

$$Re = \frac{\frac{n}{60} \times D_{blade}^2 \times \rho_f}{\mu_f} \quad (2.16)$$

Dimana :

$n$  = putaran pengaduk (rpm)

$D_{blade}$  = diameter *blade* pengaduk (m)

$\rho_f$  = massa jenis fluida fase cair ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\mu_f$  = viskositas fluida fase cair ( $\text{N.s/m}^2$ )

## 2.6. Proses Pendidihan

Pendidihan adalah suatu proses yang muncul ketika fluida mengalami kontak dengan suatu permukaan dimana suhu permukaan tersebut lebih tinggi daripada suhu saturasi fluida. Proses pendidihan ditunjukkan pada gambar 2.16. Selisih antara temperatur permukaan dengan temperatur saturasi fluida disebut sebagai  $T_{excess}$ . Besar *boiling heat flux* ( $q''$ ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.17).

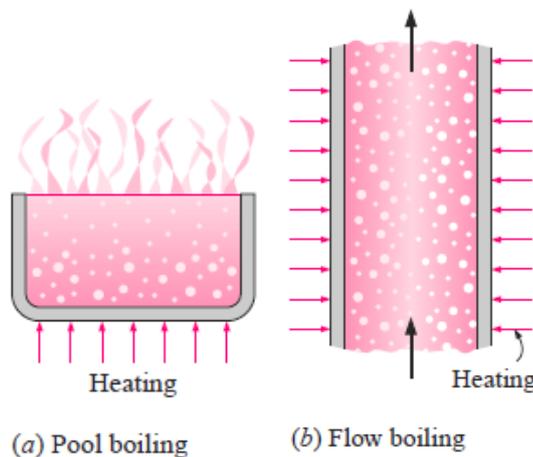
$$q'' = h(T_s - T_{sat}) \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.17)$$

Dimana :

$h$  = koefisien konveksi fluida ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

$T_s$  = temperatur permukaan (K)

$T_{sat}$  = temperatur saturasi fluida (K)

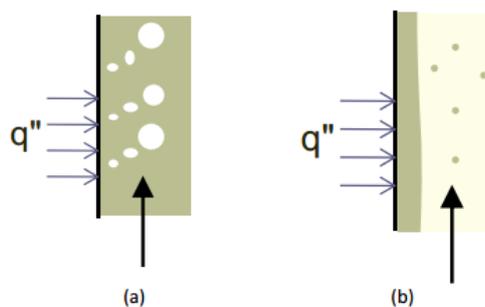
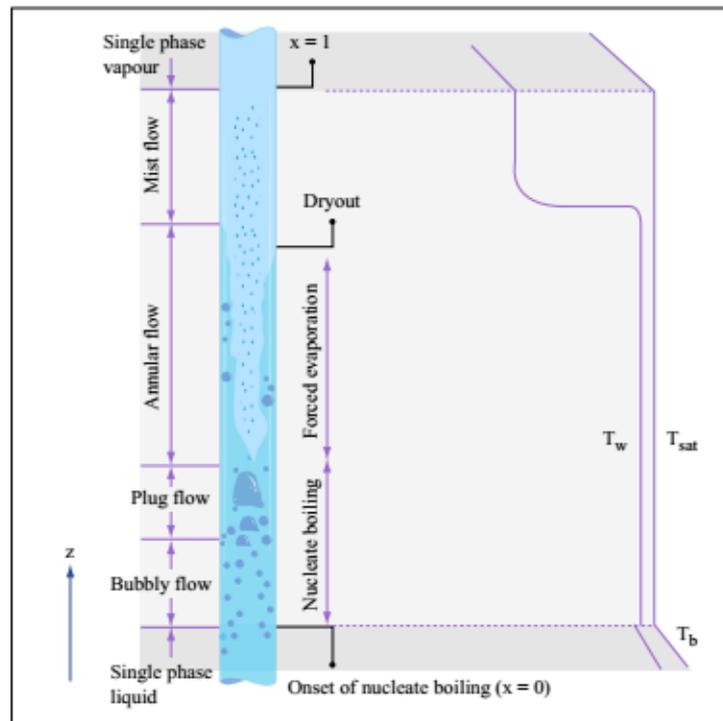


Gambar 2.16 *boiling*: a.*Pool boiling* b.*Flow boiling*

Sumber : (Incropera, 2011)

Menurut Buongiorno (2010), *flow boiling* adalah fenomena yang sering terjadi pada siklus pendinginan di bagian evaporator dimana refrigerant mengalami perubahan fase dari cair menjadi uap saat mengalir. Koefisien konveksi perpindahan panas yang ada pada kasus tersebut berbeda dengan

koefisien konveksi pada umumnya. Koefisien untuk *flow boiling* merupakan koefisien gabungan dari perpindahan panas konveksi dan *boiling*. Hal ini dikarenakan terdapat 2 fase fluida saat terjadi perpindahan panas. Gambar 2.17 menunjukkan proses *flow boiling*.



Gambar 2.17 Perubahan fase pada *flow boiling*. a.nucleat boiling b.forced evaporation

Sumber : MIT *OpenCourseWare*

Langkah untuk mencari koefisien konveksi dari *flow boiling* menurut Buongiorno (2010) adalah pertama menghitung panjang karakteristik ( $L_c$ ) dari partikel uap yang ada dengan menggunakan persamaan (2.18).

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_g)}} \text{ (m)} \quad (2.18)$$

Dimana :

$\sigma$  = tegangan permukaan fluida (N/m)

$g$  = gravitasi bumi ( $\text{m/s}^2$ )

$\rho_f$  = massa jenis fase cair fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_g$  = massa jenis fase gas fluida ( $\text{kg.m}^3$ )

Selanjutnya mencari *mass flux* ( $G$ ), yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.19).

$$G = \frac{\dot{m}}{A_c} \text{ (kg/s.m}^2\text{)} \quad (2.19)$$

Dimana :

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

$A_c$  = luas penampang aliran fluida ( $\text{m}^2$ )

Kemudian mencari kualitas massa ( $x$ ) refrigerant yang dapat dihitung dengan persamaan (2.20).

$$x = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} \quad (2.20)$$

Dimana :

$h$  = entalpi fluida kondisi nyata (kJ/kg)

$h_f$  = entalpi fluida kondisi cair (kJ/kg)

$h_g$  = entalpi fluida kondisi gas (kJ/kg)

Setelah itu langkah selanjutnya adalah menghitung *Reynold number* ( $Re_m$ ) khusus untuk *flow boiling* dengan menggunakan persamaan (2.21).

$$Re_m = G \times \left[ 1 + x \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right] \times \frac{L_c}{\mu_f} \quad (2.21)$$

Dimana :

$G$  = *mass flux* fluida ( $\text{kg/s.m}^2$ )

$x$  = kualitas massa fluida

$\rho_f$  = massa jenis fase cair fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_g$  = massa jenis fase gas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\mu_f$  = viskositas fase cair fluida ( $\text{N.s/m}^2$ )

Kemudian langkah terakhir adalah menghitung koefisien 2 fase ( $\bar{h}_{2P}$ ) pada kasus *flow boiling*, yaitu dengan menggunakan persamaan (2.22).

$$\bar{h}_{2P} = \frac{0,087 \times \text{Re}_m^{0,6} \times \text{Pr}_f^{1/6} \times \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)^{0,2} \times k_f}{L_c} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (2.22)$$

Dimana :

$\text{Re}_m$  = *Reynold number* fluida

$\text{Pr}_f$  = *Prandtl number* fluida fase cair

$\rho_f$  = massa jenis fase cair fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$\rho_g$  = massa jenis fase gas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$k_f$  = koefisien konduktivitas fase cair fluida ( $\text{W/m.K}$ )

## 2.7. Radius Kritis Insulasi

Menurut Cengel (2006), insulasi diperlukan pada suatu sistem pendingin supaya kalor dari luar tidak berpindah ke refrigerant yang seharusnya menyerap kalor dari beban sistem pendingin. Insulasi pada objek berbentuk silinder berbeda dengan plat datar. Hal ini dikarenakan apabila radius silinder semakin besar maka luas permukaan silinder semakin besar yang artinya justru menambah laju perpindahan panas. Oleh karena itu perlu dihitung panjang radius saat dimana laju perpindahan panas tertinggi terjadi dan laju perpindahan panas menurun. Panjang radius saat perpindahan panas dapat terjadi dengan optimal disebut  $R_{\text{kritis}}$ . Besar  $R_{\text{kritis}}$  dapat dihitung dengan persamaan (2.23).

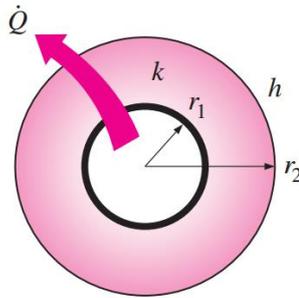
$$R_{\text{kritis}} = \frac{k_{\text{insulasi}}}{h_{\text{ambient}}} \quad (\text{m}) \quad (2.23)$$

Dimana :

$k_{\text{insulasi}}$  = koefisien konduktivitas insulasi ( $\text{W/m.K}$ )

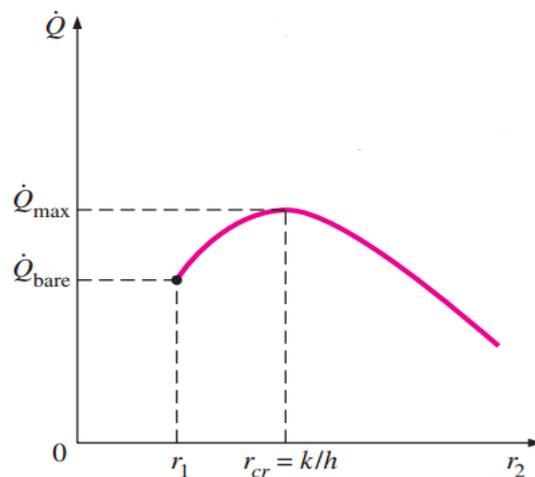
$h_{\text{ambient}}$  = koefisien konveksi lingkungan ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )

Gambar 2.18 menunjukkan insulasi pada silinder. Apabila  $r_2 > R_{\text{kritis}}$ , maka laju perpindahan panas akan justru meningkat seiring penambahan panjang radius insulasi. Jika  $r_2 = R_{\text{kritis}}$ , maka laju perpindahan panas akan menjadi optimal. Sedangkan jika  $r_2 < R_{\text{kritis}}$ , maka laju perpindahan panas akan menurun seiring penambahan panjang radius insulasi. Grafik laju perpindahan terhadap panjang radius insulasi ditunjukkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.18 Insulasi pada silinder

Sumber : (Cengel & Boles, 2006)



Gambar 2.19 Grafik laju perpindahan panas terhadap radius insulasi

Sumber : (Cengel & Boles, 2006)