

2. STUDI LITERATUR

2.1. *Showcase*

Showcase adalah lemari pendingin yang digunakan untuk menyimpan dan mendinginkan berbagai jenis minuman berkemasan, kue atau berbagai makanan ringan lainnya. Pada tahun 1965 masyarakat Jerman mendinginkan minuman dan makanan menggunakan es dan salju. Mereka mendinginkan dengan cara membuat lubang besar yang bagian dasarnya dan sekelilingnya mereka lapisi dengan bilahan kayu atau jerami. Setelah itu mereka mengikat es atau salju didalamnya kemudian menutupnya dengan rapat. Tetapi cara tersebut membutuhkan waktu yang lama untuk mendinginkan dan membutuhkan banyak orang untuk membuat alat tersebut (Pearson, 2001).

Pada tahun 1970 Steven Kloss menemukan cara mendinginkan minuman dan makanan berkemasan dengan lebih praktis. Dia menggunakan kotak yang dilapisi besi dan aluminum yang dirancang sedemikian rupa dan menggunakan listrik untuk menjalankan sistem pendingin didalamnya. Ternyata hasil karena Steven tersebut mulai banyak digunakan oleh masyarakat Jerman untuk menyimpan dan mendinginkan berbagai makanan dan minuman berkemasan. Pada tahun 1980-an *showcase* mulai menyebar ke seluruh penjuru dunia (Pearson, 2001).

2.1.1. Perbedaan *Showcase*, *Freezer*, Kulkas

Masyarakat sering berpikiran bahwa *showcase*, *freezer*, dan kulkas adalah tiga benda yang sama hanya memiliki bentuk yang mirip saja tetapi sebenarnya ketiga benda tersebut berbeda dari bentuk dan kebutuhannya walaupun sama-sama berfungsi untuk mendinginkan. *Showcase* sering dipakai pada pusat perbelanjaan maupun pada kafe. Fungsi dari *showcase* sendiri selain untuk mendinginkan minuman atau makanan yaitu untuk memamerkan makanan atau minuman yang dijual. Banyak *showcase* memiliki mekanisme penggerak pada bagian dalamnya untuk membuat makanan atau minuman didalamnya lebih menarik.

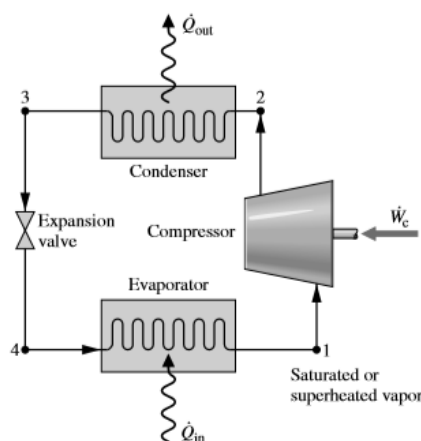
Freezer sedikit berbeda dengan *showcase*. Fungsi dari *freezer* adalah untuk membekukan makanan atau minuman dan juga menyimpan es batu ataupun es krim.

Kulkas sering dipakai di rumah-rumah maupun di pusat perbelanjaan untuk menyimpan minuman kemasan dalam keadaan dingin. Kulkas sendiri berfungsi untuk menyimpan makanan dan minuman layaknya *showcase* tetapi kulkas tidak dilengkapi mekanisme penggerak layaknya *showcase*.

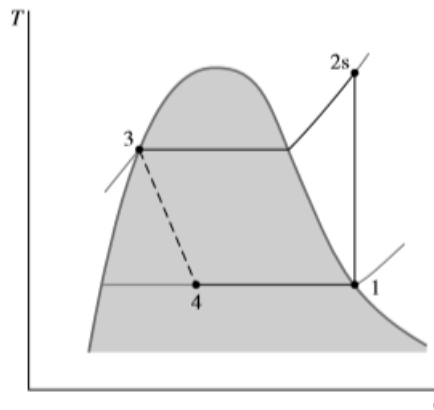
2.2. Siklus Pendingin

Siklus pendingin adalah siklus kerja yang mengirim kalor dari media bertemperatur rendah ke media bertemperatur tinggi dengan menggunakan kerja dari luar sistem. Pada lemari pendingin, siklus pendingin yang digunakan umumnya adalah siklus kompresi uap ideal. Pada siklus ini media yang digunakan untuk menyerap dan membuang kalor adalah *refrigerant*.

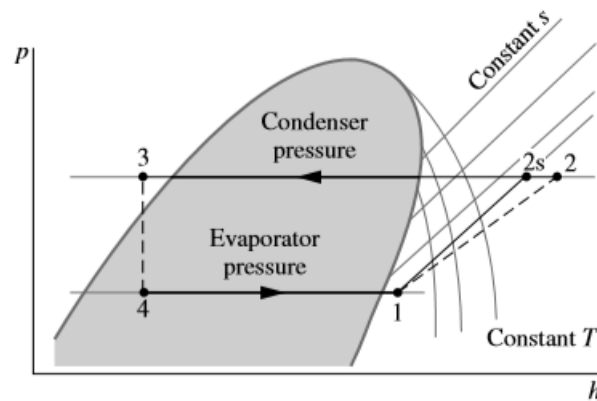
Pada siklus kompresi uap ideal, terdapat empat komponen utama yaitu kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Keempat komponen tersebut saling berkaitan untuk menghasilkan udara dingin. Selain komponen utama, terdapat beberapa komponen tambahan seperti *filter dryer* dan *accumulator* yang berfungsi untuk melancarkan proses pendinginan pada siklus kompresi uap ideal.



Gambar 2.1 Skema siklus pendingin
Sumber : Moran, Shapiro (2006 p. 455)



Gambar 2.2 Diagram T-s untuk siklus pendingin
Sumber : Moran, Shapiro (2006 p. 457)



Gambar 2.3 Diagram P-h untuk siklus pendingin
Sumber : Moran, Shapiro (2006 p. 466)

Siklus pendingin dapat dimulai ketika *refrigerant* masuk ke dalam kompresor dan mengalami proses kompresi (proses 1-2) kemudian *refrigerant* masuk kedalam kondensor (proses 2-3) dan dilanjutkan melewati katup ekspansi (proses 3-4) hingga masuk kedalam evaporator (proses 4-1) dan kembali pada kompresor (Moran and Shapiro, 2006).

Pada siklus pendingin menggunakan hukum termodinamika pertama. Menurut Cengel (2006), bunyi hukum termodinamika pertama adalah “energi tidak dapat diciptakan atau dimusnakan tetapi dapat dikonversikan ke bentuk energi yang lain”. Hukum termodinamika pertama tersebut merupakan prinsip hukum kekekalan energi yang memasukkan kalor sebagai model perpindahan energi. Dalam proses *steady flow*, maka volume, massa, kecepatan, dan total

energi akan tetap atau konstan. Hukum termodinamika pertama dapat dinyatakan dalam persamaan berikut :

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

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

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

Dimana :

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

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

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

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

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

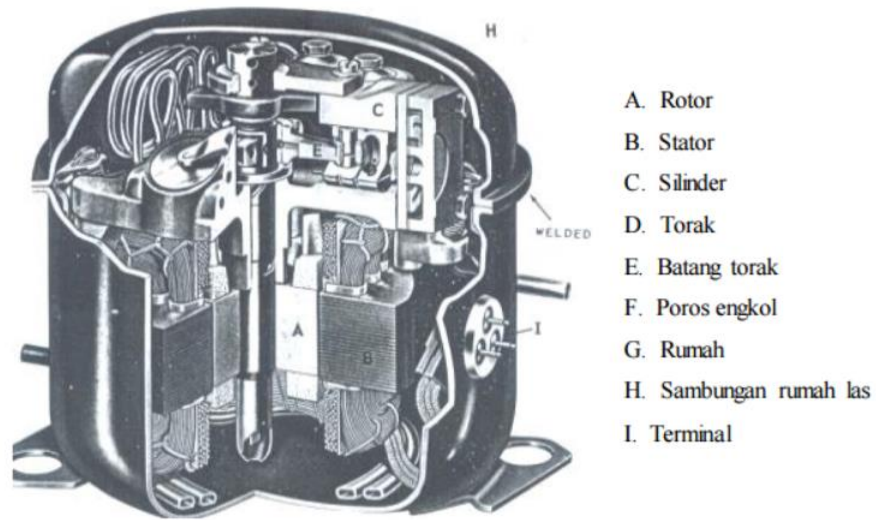
2.2.1. Kompresor

Kompresor merupakan salah satu komponen yang penting dari sistem pendingin. Kompresor berfungsi 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 pengisian angin ban, pembersihan, pneumatik, sistem pendingin. Kompresor pada sistem pendingin bekerja pada fluida tertentu yaitu *refrigerant*. Beberapa jenis kompresor yang dipakai pada sistem pendingin adalah kompresor hermetik dan kompresor *scroll*.

2.2.1.1. Kompresor Hermetik

Kompresor hermetik adalah kompresor yang motor penggerakannya disatukan dan dipatenkan dalam satu tempat di dalam kompresor tersebut. Panas motor pada kompresor hermetik akan didinginkan menggunakan *refrigerant* dari saluran pipa hisap dan oli kompresor. Kelebihan kompresor hermetik adalah rumah kompresor disambung dengan sambungan las sehingga kedap udara dari luar. Selain itu bentuk kompresor hermetik yang relatif kecil membuat harganya lebih murah sehingga sangat cocok digunakan pada sistem pendingin skala kecil.

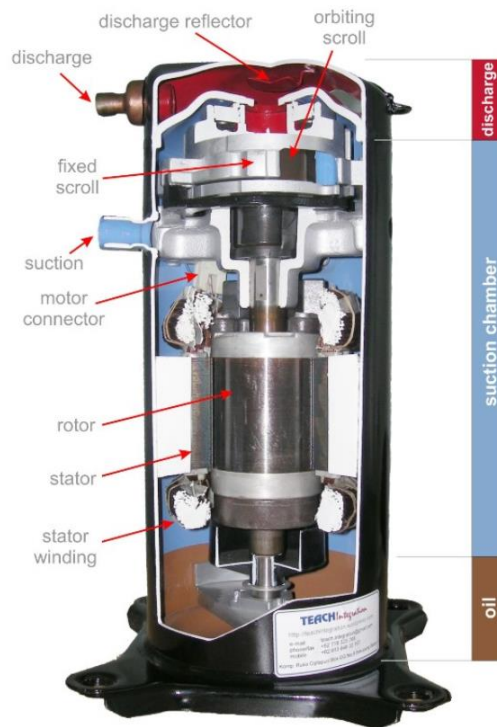
Kompresor hermetik juga memiliki tingkat kebisingan yang rendah dan getaran yang kecil (Dincer and Kanoglu, 2010).



Gambar 2.4 Kompresor hermetik
Sumber :<https://acebali.org/files/AC%20Poltek.pdf>

2.2.1.2. Kompresor Scroll

Kompresor *scroll* bekerja dengan prinsip menjebak uap *refrigerant* dan mengkompresikannya dengan penyempitan volume *refrigerant* secara perlahan-lahan. Kompresor *scroll* menggunakan konfigurasi dua *scroll* yang dipasang saling berhadapan. Kelebihan kompresor *scroll* adalah tingkat kebisingan yang rendah karena kompresor bekerja secara halus. Akan tetapi kompresor *scroll* memiliki harga yang lebih mahal (Dincer and Kanoglu, 2010).



Gambar 2.5 Kompresor *scroll*

Sumber : <https://teachintegration.files.wordpress.com/2010/05/scroll-compressor.jpg>

2.2.1.3. Kerja Kompresi (W_c)

Pada kompresor terdapat proses kompresi (proses 1-2), *refrigerant* masuk ke dalam kompresor dengan fasa uap dan bertekanan rendah. *Refrigerant* tersebut akan dikompresikan sehingga ketika keluar dari kompresor akan berfasa uap dan bertekanan tinggi. Pada proses ini dapat dihitung daya kompresor dengan menggunakan Persamaan (2.3).

$$\dot{W}_c = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2.3)$$

Dimana :

$\dot{W}_c$ = daya kompresor (kW)

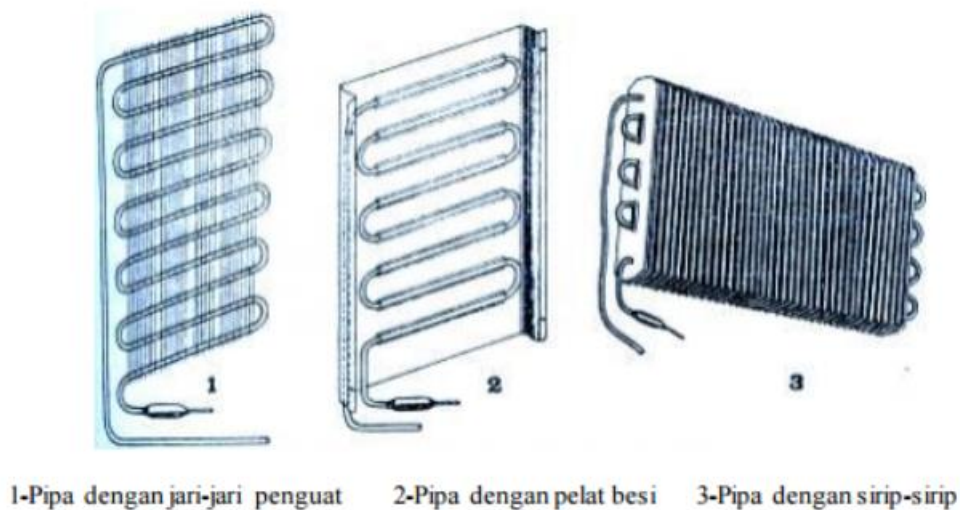
$\dot{m}$ = laju aliran massa *refrigerant* (kg/s)

h_2 = *enthalpy refrigerant* pada saat keluar kompresor (kJ/kg)

h_1 = *enthalpy refrigerant* pada saat masuk kompresor (kJ/kg)

2.2.2. Kondensor

Kondensor berfungsi untuk menurunkan temperatur refrigerant dengan cara menukar panas *refrigerant* yang dikompresi oleh kompresor ke lingkungan. Kondensor pada umumnya terdapat dua jenis yaitu kondensor berpendingin udara (*Air cooled condensor*) dan kondensor berpendingin air (*Water cooled condensor*). Pada sistem pendingin, kondensor yang lebih sering digunakan adalah kondensor berpendingin udara. Udara yang mendinginkan kondensor dapat mengalir karena aliran udara secara alami atau udara yang ditiupkan oleh kipas. Bentuk kondensor statis ada tiga macam yaitu *wire and tube* kondensor, *plat type* kondensor, dan *tube and fins* kondensor. Tipe kondensor yang paling sering digunakan adalah *tube and fins* kondensor karena memiliki laju perpindahan panas paling efektif.



Gambar 2.6 Bentuk kondensor

Sumber :<https://www.radiatorspe.co.za/images/losless/768/1024/product-pic3.jpg>

2.2.2.1. Kalor yang Dilepas Kondensor (Q_{out})

Pada proses berikutnya terjadi pada kondensor yaitu proses kondensasi (proses 2-3). *Refrigerant* yang telah keluar dari kompresor akan masuk ke dalam kondensor. Pada bagian kondensor, *refrigerant* akan mengalir dan menukarkan panasnya ke lingkungan sehingga temperatur *refrigerant* akan turun dan menyebabkan fasa *refrigerant* berubah menjadi fasa *mixture*. Besarnya kalor yang dilepas *refrigerant* dapat dihitung dengan Persamaan (2.4).

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

Dimana :

$\dot{Q}_{\text{kondensor}}$ = besar kalor yang dilepas *refrigerant* (kW)

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

h_2 = *enthalpy refrigerant* pada saat masuk kondensor (kJ/kg)

h_3 = *enthalpy refrigerant* pada saat keluar kondensor (kJ/kg)

2.2.3. Katup Ekspansi

Katup ekspansi berfungsi untuk menurunkan tekanan dan temperatur *refrigerant* dengan cara mencekik laju aliran *refrigerant*. Beberapa jenis katup ekspansi yang sering digunakan adalah TXV (*Thermostatic Expansion Valve*) dan pipa kapiler.

2.2.3.1. Pipa Kapiler

Pipa kapiler merupakan tipe katup ekspansi yang sederhana. Bentuk dari pipa kapiler adalah pipa tembaga dengan diameter lubang 0,26 mm hingga 0,7 mm. Panjang pipa kapiler untuk sebuah sistem pendingin adalah 80 cm hingga 4 m. Pemilihan besar dan panjang pipa kapiler bergantung pada seberapa besar beban pendingin pada sistem pendingin tersebut. Penggunaan pipa kapiler ini sangat sering dipakai untuk sistem pendingin skala kecil karena memiliki harga yang lebih murah dan lebih sederhana (Dincer and Kanoglu, 2010).



Gambar 2.7 Pipa Kapiler

Sumber : http://1.bp.blogspot.com/-ttGC2E17Cf4/UPQ6dYB-sII/AAAAAAAAACBQ/fc4pCjBdmhg/s1600/pipa_kapiler.jpg

2.2.3.2. TXV (*Thermostatic Expansion Valve*)

TXV merupakan katup ekspansi yang bekerja secara otomatis mengukur jumlah aliran *refrigerant* yang masuk ke dalam evaporator. TXV lebih sering digunakan pada sistem pendingin yang beban pendinginan di evaporatornya berubah-ubah. Selain itu TXV memiliki harga yang lebih mahal daripada pipa kapiler sehingga TXV lebih sering dipakai untuk sistem pendingin dalam skala besar (Dincer and Kanoglu, 2010).



Gambar 2.8 *Thermostatic expansion valve*
Sumber

:<http://www.bestbuyheatingandairconditioning.com/Merchant2/graphics/00000001/EXP18M90A.jpg>

2.2.3.3. Penurunan Suhu dan Tekanan pada Katup Ekspansi

Setelah *refrigerant* keluar dari kondensor, proses selanjutnya adalah *refrigerant* melewati katup ekspansi (proses 3-4). Pada katup ekspansi, *refrigerant* yang berfasa *mixture* dan bertekanan tinggi tadi diturunkan tekanannya dengan cara mencekik laju aliran *refrigerant* atau proses *throttling*. Sehubungan dengan turunnya tekanan maka temperatur *refrigerant* juga akan ikut turun. Pada katup ekspansi terdapat Persamaan (2.5).

$$h_3 = h_4 \quad (2.5)$$

Dimana :

h_3 = enthalpy refrigerant pada saat masuk katup ekspansi (kJ/kg)

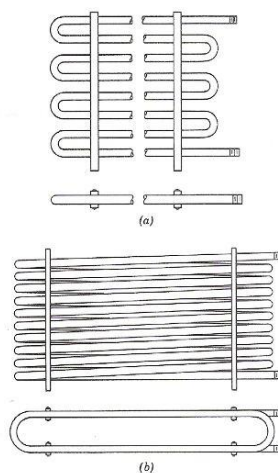
h_4 = enthalpy refrigerant pada saat keluar katup ekspansi (kJ/kg)

2.2.4. Evaporator

Evaporator merupakan komponen yang sering terlihat dalam sistem pendingin. Fungsi dari evaporator adalah menghembuskan udara dingin dari *refrigerant* yang bertemperatur rendah dan juga untuk menukarkan panas yang ada pada lingkungan dengan *refrigerant* sehingga *refrigerant* berubah menjadi uap saat keluar dari evaporator. Beberapa tipe evaporator yang digunakan dalam sistem pendingin adalah *baretube* evaporator, *plate surface* evaporator, dan *finned tube* evaporator (Dincer and Kanoglu, 2010).

2.2.4.1. Baretube Evaporator

Baretube evaporator terbuat dari pipa tembaga atau pipa baja. Pipa tembaga digunakan untuk evaporator kecil dimana *refrigerant* yang digunakan adalah *refrigerant* pada umumnya selain amonia. Pipa baja digunakan untuk evaporator besar dimana amonia digunakan sebagai pendingin. *Baretube* evaporator merupakan pipa evaporator biasa yang ditekuk menjadi beberapa lengkungan pipa. Kelebihan *baretube* evaporator adalah bentuk lengkungan pipa dapat disesuaikan dengan bentuk kabin penyimpanan makanan, tetapi laju perpindahan panas pada pipa evaporator kurang baik (Dincer and Kanoglu, 2010).



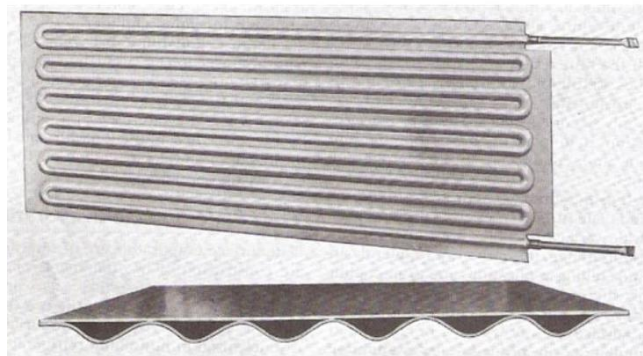
Gambar 2.9 *Baretube* evaporator

Sumber

:https://img.bhs4.com/dd/c/ddc7a360d0e21c143406fa08c5900b2a71fc1dd9_large.jpg

2.2.4.2. **Plate Surface Evaporator**

Bentuk dari *plate surface* evaporator tampak seperti lempengan tunggal yang didalamnya terdapat beberapa lilitan dari tabung logam. Tabung logam tersebut terbuat dari tembaga atau aluminium yang nantinya akan dilalui oleh *refrigerant*. Keuntungan dari evaporator jenis ini adalah bentuk lilitan logam yang menjadi satu dengan lempengan sehingga bentuknya lebih tipis. *Plate surface* evaporator lebih sering digunakan sebagai partisi di dalam *freezer* atau kulkas karena memiliki fleksibilitas yang tinggi (Dincer and Kanoglu, 2010).

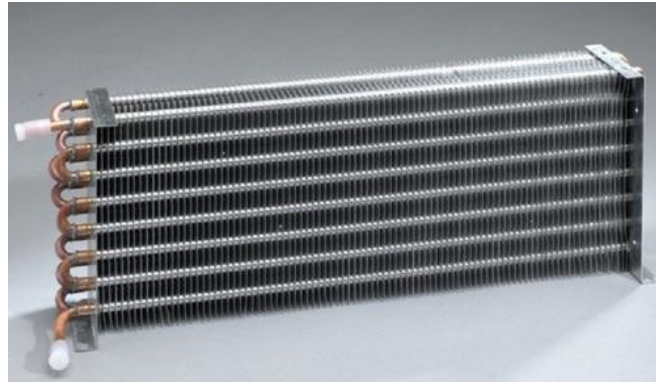


Gambar 2.10 *Plate surface* evaporator

Sumber : <https://www.brighthubengineering.com/hvac/61270-types-of-refrigeration-evaporators/>

2.2.4.3. **Finned Evaporator**

Finned evaporator adalah tipe *baretube* evaporator yang ditambah dengan sirip. Sirip tersebut berfungsi sebagai pertambahan lebar permukaan pipa yang bersinggungan dengan udara. *Finned* evaporator ini memiliki laju perpindahan panas yang paling besar dibandingkan dengan beberapa jenis evaporator lainnya (Dincer and Kanoglu, 2010).



Gambar 2.11 *Finned* evaporator

Sumber : <https://5.imimg.com/data5/ET/XL/MY-2437446/finned-evaporator-500x500.jpg>

2.2.4.4. Kalor yang Diserap Evaporator (Q_{in})

Proses selanjutnya berada di dalam evaporator. *Refrigerant* yang memiliki tekanan dan temperatur rendah mengalir melewati evaporator dan dengan bantuan kipas, udara dingin dihembuskan keluar dari evaporator. Selain menghembuskan udara dingin, *refrigerant* juga menyerap kalor dari ruangan yang didinginkan sehingga temperatur *refrigerant* akan naik dan fasanya akan berubah menjadi uap kembali agar dapat masuk ke dalam kompresor. Besar kalor yang diserap *refrigerant* didalam evaporator dapat dihitung dengan Persamaan (2.6) (Moran and Shapiro, 2006).

$$\dot{Q}_{\text{evaporator}} = \dot{m}(h_1 - h_4) \quad (2.6)$$

Dimana :

$\dot{Q}_{\text{evaporator}}$ = besar kalor yang diserap *refrigerant* (kW)

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

h_1 = *enthalpy refrigerant* pada saat keluar evaporator (kJ/kg)

h_4 = *enthalpy refrigerant* pada saat masuk evaporator (kJ/kg)

2.2.5. Filter Dryer

Filter dryer adalah sebuah komponen tambahan pada suatu sistem pendingin. 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. Pemilihan *filter dryer* pada sistem pendingin didasarkan pada banyaknya saringan yang diinginkan serta tingkat kerapatan saringan. Pada *filter dryer* yang berukuran besar terdapat jumlah saringan yang lebih banyak dibanding *filter dryer* yang lebih kecil.



Gambar 2.12 *Filter Dryer*

Sumber : http://www.weiku.com/products/9741514/Filter_Dryer.html

2.2.6. *Accumulator*

Menurut ASHRAE (2012), *accumulator* adalah komponen tambahan pada sistem pendingin yang berfungsi untuk memisahkan fase gas dengan fase cair *refrigerant* sebelum masuk kompresor. Pemilihan *accumulator* pada sistem pendingin didasarkan pada tekanan pada kompresor. Apabila *accumulator* yang dipilih ukurannya terlalu kecil maka dapat menyebabkan penurunan tekanan pada kompresor, tetapi apabila ukurannya terlalu besar maka dapat menyebabkan pengurangan kecepatan aliran *refrigerant*.



Gambar 2.13 *Accumulator*

Sumber : <http://www.dycom.co.id/products/cat/chaori-hydraulic-accumulator/1340>

2.2.7. Koefisien Performansi (COP)

Siklus pendingin juga memiliki parameter untuk mengetahui performa dari siklus. Parameter tersebut adalah COP (*Coefficient of Performance*). COP dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.7).

$$\beta = \frac{\dot{Q}_{\text{evaporator}}}{\dot{W}_c} = \frac{\dot{m}(h_1 - h_4)}{\dot{m}(h_2 - h_1)} \quad (2.7)$$

Dimana :

- β = *Coefficient of Performance* dari siklus
- $\dot{W}_c$ = daya kompresor (kW)
- $\dot{Q}_{\text{evaporator}}$ = besar kalor yang diserap *refrigerant* (kW)
- $\dot{m}$ = laju aliran massa *refrigerant* (kg/s)
- h_1 = *enthalpy refrigerant* pada saat keluar evaporator / masuk kompresor (kJ/kg)
- h_2 = *enthalpy refrigerant* pada saat keluar kompresor (kJ/kg)
- h_4 = *enthalpy refrigerant* pada saat masuk evaporator (kJ/kg)

2.2.8. Refrigerant

Refrigerant adalah sebuah media berupa fluida perambat panas yang menyerap panas dengan menguap pada temperatur dan tekanan tinggi serta melepaskan panas dengan mengembun pada temperatur dan tekanan rendah. Jadi *refrigerant* yang ada pada sistem pendingin mudah mengalami perubahan fasa dari cair menjadi gas maupun sebaliknya.

Beberapa sifat yang perlu ada pada *refrigerant* yaitu:

- Mudah menguap karena pendinginan (penyerapan panas) terjadi ketika *refrigerant* menguap.
- Dapat menarik panas latent sebanyak-banyaknya. Jika semakin besar panas latent yang diserap selama penguapan, volume sirkulasi *refrigerant* dapat semakin diperkecil, maka dapat memperkecil alat pendingin.
- Tidak terjadi perubahan kimia dari kandungan unsur-unsur dalam *Refrigerant* walaupun dipakai secara berulang-ulang.

- Tidak merusak logam dan karet yang digunakan dalam air conditioner system.

Menurut standar ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*), *refrigerant* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa kelompok yaitu :

- *Refrigerant primer*:
 - *Refrigerant Halocarbon compounds*;
 - *Refrigerant CFC*
 - *Refrigerant HCFC*
 - *Refrigerant HFC*
 - *Refrigerant Hydrocarbon compounds*
 - *Refrigerant Inorganic Compounds*
 - *Refrigerant Azeotropes*
 - *Refrigerant Nitrogen Compounds*
 - *Refrigerant Oxygen Compounds*
 - *Refrigerant Cyclic Organic Compounds*
 - *Refrigerant Unsaturated Organic Compounds*
 - *Refrigerant Sulfur Compounds*
- *Refrigerant Sekunder*
 - Larutan garam (Brine)
 - Larutan anti beku
 - Larutan air dengan glikol etilen
 - Larutan air dengan glikol propilen
 - Larutan air dengan kalsium klorida
 - Air
- *Refrigerant Dua Substansi*
 - Air - amoniak
 - Air - alkohol
 - LiBr - air

Beberapa *refrigerant* yang sekarang sering dipakai adalah R-12, R-22, dan R-134a. Ketiga jenis *refrigerant* tersebut merupakan jenis *refrigerant halocarbon compounds* (Pearson, 2001). *Refrigerant* tersebut juga memiliki dampak pada

lingkungan ketika digunakan yaitu dapat membuat lapisan ozon berlubang dan efek *global warming*. Berdasarkan dampak dari *refrigerant* tersebut maka *refrigerant* yang berbahaya diberi nilai ODP (*Ozone Depletion Potential*) dan GWP (*Global Warming Potential*) tinggi.

Tabel 2.1 Nilai ODP dan GWP *refrigerant*

Sumber : Linde Gas AG (n.d., p.1-2)

Type	Product number	ODP	GWP
CFC	12	1	10900
	502	0,33	4657
HCFC	22	0,055	1810
	123	0,06	77
	401A	0,033	1182
	401B	0,036	1288
	402A	0,019	2788
	402B	0,03	2416
	408A	0,024	3152
	409A	0,046	1909
HFC	23	0	14800
	32	0	675
	134a	0	1430
	404A	0	3922
	407A	0	2107
	407C	0	1774
	407F	0	2088

2.3. 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 :

2.3.1. Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan panas dimana kalor berpindah melalui suatu media yang diam di tempat atau media tidak bergerak. *Flux* panas (q_x) konduksi ditentukan dengan persamaan Fourier's Law (Cengel, 2005). Perhitungan *flux* panas secara konduksi dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.8).

$$q_x = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{R_{thermal}} \quad (2.8)$$

Dimana :

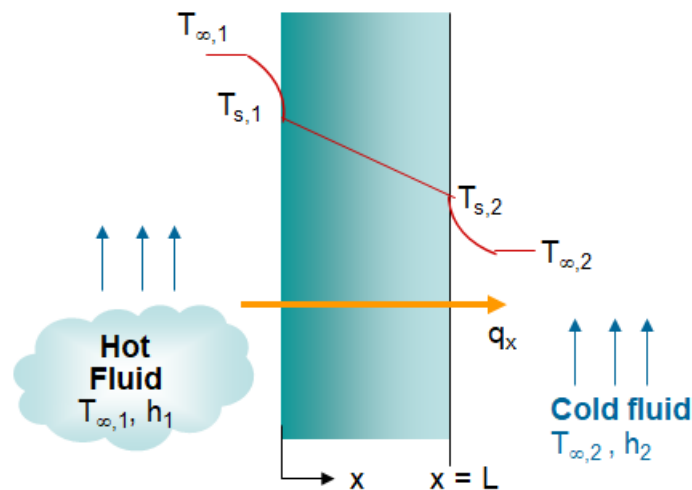
q_x = *flux* panas konduksi (W/m^2)

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

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

$R_{thermal}$ = tahanan termal

Jika sistem media perpindahan panas konduksi secara linier maka besar tahanan konduksi termal ($R_{conduction}$) dinyatakan dalam Persamaan (2.9). Gambar 2.14 menunjukkan proses perpindahan panas konduksi dengan sistem linier.



Gambar 2.14 Konduksi sistem linier

Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

$$R_{conduction} = \frac{L}{kA} \quad (2.9)$$

Dimana :

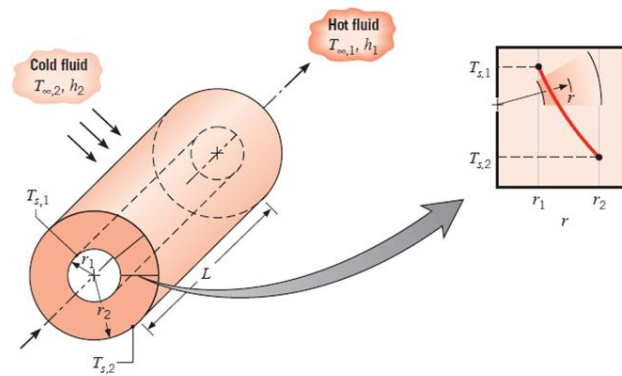
$R_{conduction}$ = tahanan konduksi termal ($W/m^2 \cdot K$)

L = tebal material media perpindahan panas (m)

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

A = luas permukaan yang mengalami kontak perpindahan panas (m^2)

Apabila sistem menjadi silinder maka besar tahanan konduksi termal silinder ($R_{cyl,conduction}$) dinyatakan dalam Persamaan (2.10). Gambar 2.15 menunjukkan proses perpindahan panas konduksi dengan sistem silinder.



Gambar 2.15 Konduksi sistem silinder
Sumber : (Cengel & Boles, 2005)

$$R_{cyl,conduction} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi Lk} \quad (2.10)$$

Dimana :

$R_{cyl,conduction}$ = tahanan konduksi termal silinder ($W/m^2 \cdot K$)

r_1 = jari-jari dalam (m)

r_2 = jari-jari luar (m)

L = panjang silinder (m)

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

2.3.2. Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas yang terjadi melalui media penghantar panas yang mengalir atau bergerak. Media tersebut mengalir dapat disebabkan oleh dua faktor, yaitu secara alami dan secara paksa. Maka dari itu konveksi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu konveksi alami dan konveksi paksa (Cengel, 2005). Laju perpindahan panas yang terjadi secara konveksi (q'') secara umum dapat dituliskan dengan Persamaan (2.11)

$$q'' = h(T_1 - T_2) \quad (2.11)$$

Dimana :

q'' = Laju perpindahan panas secara konveksi (W/m^2)

T_1 = temperatur fluida 1 (K)

T_2 = temperatur fluida / permukaan benda 2 (K)

h = koefisien konveksi termal ($W/m^2 \cdot K$)

2.3.2.1. 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 putara dari bawah ke atas (Cengel, 2005).

Pada konveksi alami terdapat variabel *Grashof number* (Gr). *Grashof number* merupakan suatu besaran yanpa dimensi yang menjadi variebel dalem menghitung *Rayleigh number* (Ra_L). *Grashof number* dapat dihitung dengan Persamaan (2.12).

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

Dimana :

Gr = *Grashof number*

β = koefisien ekspansi volume

g = gravitasi bumi (m/s^2)

T_s = temperatur permukaan (K)

T_∞ = temperatur udara lingkungan (K)

L_c = panjang karakteristik benda (m)
 ν = viskositas kinematik fluida (m²/s)

Koefisien ekspansi volume (β) untuk gas ideal dapat dihitung dengan Persamaan (2.13).

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

Dimana :

β = koefisien ekspansi volume
 T_f = temperatur rata-rata udara lingkungan dan permukaan benda (K)

Kemudian untuk mencari *Rayleigh number* (Ra_L) dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.14).

$$Ra_L = Gr \times Pr \quad (2.14)$$

Dimana :

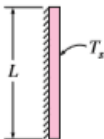
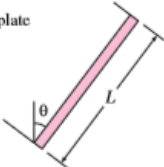
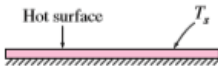
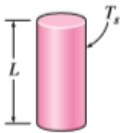
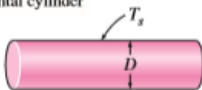
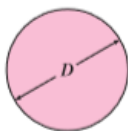
Gr = *Grashof number*
 Pr = *Prandtl number*

Tabel 2.2 menunjukkan korelasi untuk mencari *Nusselt number* pada konveksi alami terhadap masing-masing bentuk benda.

2.3.2.2. 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 kipas, *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 didalamnya terdapat variabel *Reynold number* dan *Nusselt number*. Menurut Prithcard (2011), besar *Reynold number* (Re) untuk aliran internal dinyatakan dalam Persamaan (2.15).

Sumber : (Cengel, 2005)

Geometry	Characteristic length L_c	Range of Ra	Nu
Vertical plate 	L	10^4 – 10^9 10^9 – 10^{13} Entire range	$Nu = 0.59Ra_l^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_l^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_l^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-21) (complex but more accurate)
Inclined plate 	L		Use vertical plate equations for the upper surface of a cold plate and the lower surface of a hot plate Replace g by $g \cos \theta$ for $Ra < 10^9$
Horizontal plate (Surface area A and perimeter p) (a) Upper surface of a hot plate (or lower surface of a cold plate) 	A_s/p	10^4 – 10^7 10^7 – 10^{11}	$Nu = 0.54Ra_l^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_l^{1/3}$ (9-23)
(b) Lower surface of a hot plate (or upper surface of a cold plate) 		10^6 – 10^{11}	$Nu = 0.27Ra_l^{1/4}$ (9-24)
Vertical cylinder 	L		A vertical cylinder can be treated as a vertical plate when $D \geq \frac{35L}{Gr_l^{1/4}}$
Horizontal cylinder 	D	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ (9-25)
Sphere 	D	$Ra_D \leq 10^{11}$ ($Pr \geq 0.7$)	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$ (9-26)

Dimana :

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

Universitas Kristen Petra

- D = diameter penampang saluran (m^2)
 μ = viskositas fluida ($N.s/m^2$)

Reynold number merupakan parameter tanpa dimensi untuk menentukan jenis aliran suatu fluida atau turbulen. Apabila nilai *Reynold number* lebih kecil dari 2300 maka aliran tersebut laminar, jika antara 2300 sampai 10000 maka aliran tersebut transisi laminar menjadi turbulen, jika lebih besar dari 10000 maka aliran tersebut turbulen sepenuhnya (Cengel, 2005).

2.3.2.3. Overall Heat Transfer Coefficient

Overall heat coefficient merupakan koefisien perpindahan panas keseluruhan pada suatu sistem perpindahan panas. Koefisien panas keseluruhan pada sistem silinder dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.16) (Cengel, 2006).

$$U_i \cdot A_{c \text{ inside}} = \frac{1}{\frac{1}{h \cdot A_{c \text{ inside}}} + \frac{\ln(ro/ri)}{2\pi k L} + \frac{1}{h \cdot A_{c \text{ outside}}}} \quad (2.16)$$

Dimana :

- U_i = Overall heat transfer coefficient ($W/m^2.K$)
 h = koefisien konveksi fluida ($W/m.K$)
 $A_{c \text{ inside}}$ = luas penampang silinder dalam (m^2)
 $A_{c \text{ outside}}$ = luas penampang silinder luar (m^2)
 k = konduktivitas termal ($W/m^2.K$)
 L = panjang silinder (m^2)
 ro = jari-jari silinder luar (m)
 ri = jari-jari silinder dalam (m)

2.4. 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. Selisih antara temperatur permukaan dengan temperatur saturasi fluida disebut T_{excess} . Besar *boiling heat flux* (q'') dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan (2.17).

$$q'' = h(T_s - T_{\text{sat}}) \quad (2.17)$$

Dimana :

q'' = *boiling heat flux* (W/m²)

h = koefisien konveksi fluida (W/m² .K)

T_s = temperatur permukaan (K)

T_{sat} = temperatur saturasi fluida (K)

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 untuk *flow boiling* merupakan koefisien gabungan dari perpindahan panas konveksi dan *boiling*. Hal ini dikarenakan terdapat dua fase fluida saat terjadi perpindahan panas.

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

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

Dimana :

L_c = panjang karakteristik (m)

σ = tegangan permukaan fluida (N/m)

g = gravitasi bumi (m/s²)

ρ_f = massa jenis fase cair fluida (kg/m³)

ρ_g = massa jenis fase gas fluida (kg/m³)

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

$$G = \frac{\dot{m}}{A_c} \quad (2.19)$$

Dimana :

G = *mass flux* (kg/s.m²)

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

A_c = luas penampang aliran fluida (m²)

Kemudian mencari kualitas (x) *refrigerant* yang dapat dihitung dengan Persamaan (2.20).

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

Dimana :

- x = kualitas massa *refrigerant*
- 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).

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

Dimana :

- Re_m = *Reynold number flow boiling*
- G = *mass flux* fluida (kg/s.m²)
- x = kualitas massa fluida
- ρ_f = massa jenis fase cair fluida (kg/m³)
- ρ_g = massa jenis fase gas fluida (kg/m³)
- L_c = panjang karakteristik (m)
- μ_f = viskositas fase cair fluida (N.s/m²)

Kemudian langkah terakhir adalah menghitung koefisien 2 fase (h_{2p}) pada kasus *flow boiling* dengan menggunakan Persamaan (2.22).

$$h_{2p} = \frac{0,087 \times Re_m^{0,6} \times Pr_f^{1/6} \times \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0,2} \times k_f}{L_c} \quad (2.22)$$

Dimana :

- h_{2p} = koefisien 2 fase *flow boiling* (W/m².K)
- Re_m = *Reynold number flow boiling*
- Pr_f = *Prandtl number* fluida fase cair

- ρ_f = massa jenis fase cair fluida (kg/m^3)
 ρ_g = massa jenis fase gas fluida (kg/m^3)
 k_f = koefisien konduktivitas fase cair fluida (W/m.K)
 L_c = panjang karakteristik (m)

2.5. Heat Exchanger

Heat exchanger merupakan metode pertukaran panas antara dua fluida yang memiliki perbedaan temperatur tanpa mencampur kedua fluida tersebut. *Heat exchanger* dapat dianalisa dengan menggunakan metode NTU. Metode tersebut memungkinkan menganalisa pertukaran panas walaupun tidak diketahui temperatur keluaran salah satu fluida (Cengel, 2006).

Langkah pertama untuk menganalisa pertukaran panas dengan metode NTU adalah menghitung *heat capacity rates* dengan menggunakan Persamaan (2.23).

$$C = \dot{m} \times Cp \quad (2.23)$$

Dimana :

C = *heat capacity rates* ($\text{W/}^\circ\text{C}$)

$\dot{m}$ = laju aliran massa fluida

Cp = kalor jenis fluida

Kemudian menghitung *capacity ratio* dengan menggunakan Persamaan (2.24).

$$c = \frac{C_{min}}{C_{max}} \quad (2.24)$$

Dimana :

c = *capacity ratio*

C_{min} = *minimum heat capacity rates* ($\text{W/}^\circ\text{C}$)

C_{max} = *maximum heat capacity rates* ($\text{W/}^\circ\text{C}$)

Setelah itu menghitung *maximum rate of heat transfer* dengan menggunakan Persamaan (2.25).

$$Q_{max} = C_{min}(T_{min} - T_{max}) \quad (2.25)$$

Dimana :

Q_{max} = maximum rate of heat transfer (W)

C_{min} = minimum heat capacity rates (W/°C)

T_{min} = Temperatur minimum (°C)

T_{max} = Temperatur maksimum (°C)

Langkah selanjutnya yaitu menghitung *effectiveness* dengan menggunakan Persamaan (2.26).

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}} \quad (2.26)$$

Dimana :

ε = *effectiveness*

Q = *heat transfer*

Q_{max} = maximum rate of heat transfer (W)

Langkah terakhir adalah menghitung *number of transfer unit* (NTU) dengan menggunakan Persamaan (2.27). Hubungan NTU dengan *effectiveness* ditunjukkan pada Tabel 2.3.

$$NTU = \frac{A_s \times U_i}{C_{min}} \quad (2.27)$$

Dimana :

NTU = *number of transfer unit*

A_s = luas penampang pipa (m²)

U_i = *overall heat coefficient* (W/m².°C)

C_{min} = minimum heat capacity rates (W/°C)

Tabel 2.3 Hubungan NTU dengan *effectiveness*

Sumber : (Cengel, 2005)

Heat exchanger type	NTU relation
1 <i>Double-pipe:</i> Parallel-flow	$NTU = -\frac{\ln [1 - \varepsilon(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$NTU = \frac{1}{c - 1} \ln \left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon c - 1} \right)$
2 <i>Shell and tube:</i> One-shell pass 2, 4, . . . tube passes	$NTU = -\frac{1}{\sqrt{1 + c^2}} \ln \left(\frac{2/\varepsilon - 1 - c - \sqrt{1 + c^2}}{2/\varepsilon - 1 - c + \sqrt{1 + c^2}} \right)$
3 <i>Cross-flow (single-pass)</i> $C_{\max}$ mixed, $C_{\min}$ unmixed	$NTU = -\ln \left[1 + \frac{\ln (1 - \varepsilon c)}{c} \right]$
$C_{\min}$ mixed, $C_{\max}$ unmixed	$NTU = -\frac{\ln [c \ln (1 - \varepsilon) + 1]}{c}$
4 <i>All heat exchangers</i> with $c = 0$	$NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$

2.6. Kondensasi

Kondensasi atau pengembunan adalah perubahan wujud zat dari wujud gas menjadi wujud cair. Kondensasi dapat terjadi saat uap air di udara bersentuhan dengan permukaan benda yang temperaturnya lebih dingin dari titik embun uap air, sehingga uap air tersebut akan terkondensasi menjadi titik-titik embun (Cengel, 2005).

Kondensasi pada suatu permukaan benda dapat diatasi dengan beberapa cara. Cara pertama adalah memberikan insulasi pada permukaan tersebut sehingga permukaan benda tidak bersentuhan langsung dengan udara. Cara yang lainnya adalah menggunakan prinsip *double pane window* apabila permukaan yang digunakan adalah kaca. Prinsip *double pane window* adalah memberi celah vakum diantara dua kaca. Tujuan dari celah vakum tersebut agar udara tidak bersentuhan langsung dengan permukaan kaca yang dingin sehingga tidak terbentuk kondensasi udara (Robin, 2005).