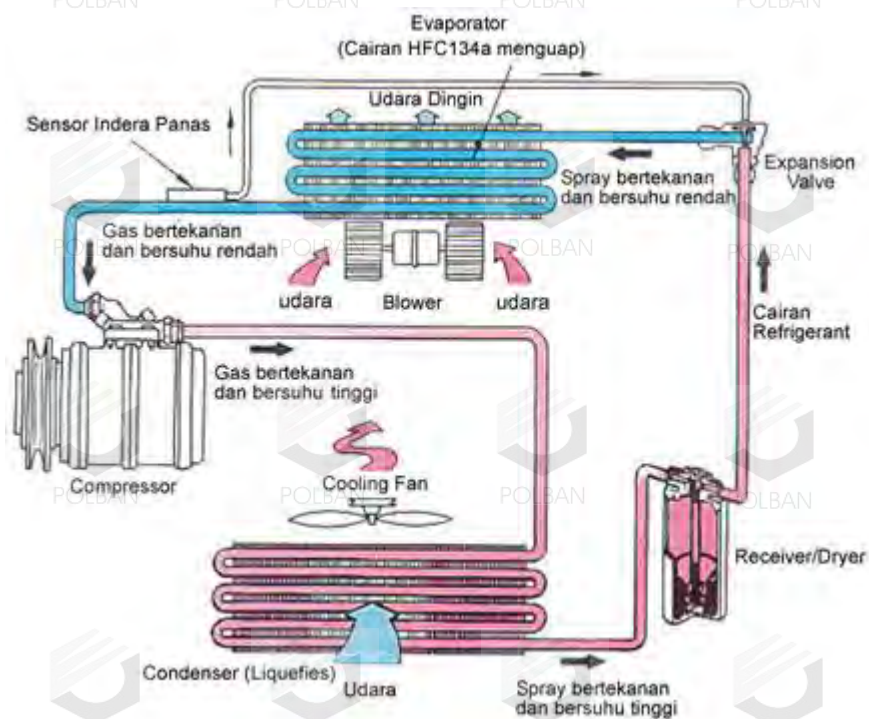


BAB II DASAR TEORI

2.1 Sistem Refrigerasi Kompresi Uap

Sistem Refrigerasi Kompresi Uap merupakan system yang digunakan untuk mengambil sejumlah panas dari suatu barang atau benda lainnya dengan memanfaatkan refrigeran sebagai medianya. Sistem refrigerasi kompresi uap bekerja dengan komponen-komponen yang saling berhubungan dan mempunyai fungsi di tiap-tiap komponennya.

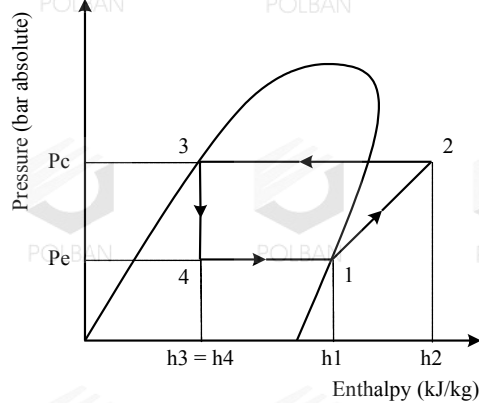
Refrigeran dalam siklus refrigerasi terlihat seperti gambar di bawah ini



Gambar 2.1 siklus refrigerasi

Sepanjang jalur tersebut refrigeran mengalir melalui pipa tembaga yang menghubungkan antar komponen sehingga akan menghasilkan dampak pendinginan.

Dalam diagram p-h dapat digambarkan seperti ini :



Gambar 2.2 diagram P-h

Proses kerja siklus refrigerasi adalah sebagai berikut:

1. Proses 1-2, yaitu: Kerja Kompresi

Proses ini terjadi di kompresor dan fasa refrigeran yang masuk ke kompresor adalah uap jenuh, dengan tekanan dan temperatur yang rendah. Kerja diberikan pada refrigeran dengan cara dipompa agar tekanannya naik sehingga temperaturnya pun ikut naik. Pada fasa ini uap refrigeran berubah dari fasa uap bertekanan dan bertemperatur rendah menjadi uap bertekanan dan bertemperatur tinggi.

Disini, temperatur refrigeran lebih tinggi dari temperatur lingkungan tempat kompresor tersebut ditempatkan. Refrigeran mengalami kompresi secara isentropik. Kerja yang diberikan pada refrigeran akan menyebabkan kenaikan tekanan, sehingga temperatur refrigeran akan lebih besar dari temperatur lingkungan. Hal tersebut dapat dicapai dengan membuat proses berlangsung secara isentropik, dengan asumsi bahwa:

- Tidak ada gesekan di kompresor
- Tidak terjadi pertukaran panas antara refrigeran dan kompresor.

Kerja yang dilakukan kompresor dapat diketahui dengan cara:

$$W = \dot{m} \cdot q_w \dots \dots \dots (1)$$

$$W = \dot{m} \cdot (h_2 - h_1) \dots \dots \dots (2)$$

dengan,

W = Kerja yang dilakukan kompresor (kJ/s)

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

h_1 = Entalpi masukan kompresor (kJ/kg)

h_2 = Entalpi keluaran kompresor (kJ/kg)

2. Proses 2-3, yaitu: Kondensasi (pengembunan)

Proses ini terjadi di kondensor, karena temperatur refrigeran lebih tinggi daripada temperatur lingkungan, maka kalor dari refrigeran panas akan dilepas melalui dinding pipa kondensor ke lingkungan sekitar. Proses pelepasan atau perpindahan kalor secara konveksi dari refrigeran ini dapat dilakukan secara konveksi alami (natural) maupun secara konveksi paksa melalui *fan*.

Pada saat uap refrigeran yang berasal dari *discharge* kompresor masuk kondensor maka uap (*superheat*) tersebut akan mengembun pada keadaan saturasi. Selama dalam kondensor, baik tekanan ataupun temperatur akan tetap tinggi, namun refrigeran akan berubah fasa menjadi fasa cair. Kalor yang dilepas kondensor diketahui dengan cara:

$$Q_c = \dot{m} \cdot (h_2 - h_3) \dots\dots\dots(3)$$

dengan,

Q_c = Kalor yang dilepas kondensor (kJ/s)

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

h_2 = Entalpi masukan kondensor (kJ/kg)

h_3 = Entalpi keluaran kondensor (kJ/kg)

Untuk menghasilkan efek refrigerasi terus menerus, uap refrigeran harus diembunkan di kondensor pada laju sama dengan cairan refrigeran diuapkan di evaporator. Ini artinya bahwa kalor harus keluar dari sistem pada kondensor pada laju sama dengan kalor masuk ke sistem di evaporator dan saluran *suction* juga di kompresor sebagai hasil dari kerja

kompresi. Akibatnya peningkatan laju penguapan akan meningkatkan keperluan laju perpindahan kalor pada kondensor.

3. Proses 3-4, yaitu: Ekspansi

Proses ini terjadi di alat ekspansi dalam entalpi yang konstan, artinya tidak ada sejumlah kalor yang dibuang atau diterima (adiabatis). Pada proses ini, tekanan dan temperatur refrigeran cair diturunkan dan fasanya berubah menjadi campuran (cair dan gas) selanjutnya akan mengalami proses evaporasi.

4. Proses 4-1, yaitu: Evaporasi

Proses ini terjadi di evaporator, dimana temperatur refrigeran di evaporator dibuat lebih rendah dari ruang refrigerasi, agar terjadi proses penguapan maka dibutuhkan kalor, kalor tersebut diambil dari lingkungan sekitar. Setelah refrigeran diekspansikan secara irreversibel adiabatik menjadi cairan bertekanan rendah, dan refrigeran akan masuk menuju evaporator.

Setelah masuk di evaporator, refrigeran akan berubah fasa dari fasa campuran (cair-uap) menjadi fasa uap jenuh.

Kalor yang diserap di evaporator dapat diketahui sebagai berikut:

$$Q_e = \dot{m} \cdot q_e \dots \dots \dots (4)$$

$$Q_e = \dot{m} \cdot (h_1 - h_4) \dots \dots \dots (5)$$

Dengan,

Q_e = Kalor yang diserap evaporator (kJ/s)

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

h_1 = Entalpi keluaran evaporator (kJ/kg)

h_4 = Entalpi masukan evaporator (kJ/kg)

Berdasarkan besaran-besaran diatas maka akan didapat prestasi siklus kompresi uap standar atau yang biasa disebut dengan COP

(Coefficient of Performance) sistem. COP didapat dari perbandingan antara efek refrigerasi dengan kerja kompresi.

Untuk menghitung besarnya COP dapat digunakan persamaan sebagai berikut:

a. COP_{actual} adalah perbandingan kalor yang diserap oleh evaporator dari lingkungan terhadap kerja yang dilakukan oleh kompresor.

Dapat diketahui bahwa :

$$COP_{actual} = \frac{Q_e}{W} \dots \dots \dots (6)$$

sehingga berdasarkan persamaan 4 dan 1 dapat diturunkan menjadi :

$$COP_{actual} = \frac{\dot{m} \cdot q_e}{\dot{m} \cdot q_w} = \frac{q_e}{q_w} \dots \dots \dots (7)$$

b. COP_{carnot} adalah perbandingan temperatur evaporasi dibandingkan dengan selisih temperatur kondensasi dan evaporasi.

Satuan temperatur yang digunakan dalam rumus COP_{carnot} adalah Kelvin

$$COP_{carnot} = \frac{T_{evaporasi}}{T_{kondensasi} - T_{evaporasi}} \dots \dots \dots (8)$$

c. Efisiensi refrigerasi adalah perbandingan antara COP_{actual} dan COP_{carnot} .

$$efisiensi = \frac{COP_{actual}}{COP_{carnot}} \dots \dots \dots (9)$$

2.2 Sistem Udara Penuh (All Air System)

Sistem udara penuh adalah sistem pendinginan pada ruangan dengan cara menyuplai udara dingin ke ruangan tersebut. Karena yang disuplai ke ruangan adalah udara dingin maka sistem udara penuh

membutuhkan alat untuk pengolahan udara. Alat pengolahan udara yang digunakan biasa dikenal dengan istilah *Air Handling Unit* (AHU).

Dalam proses pendistribusian udara dingin (udara suplay) dari AHU keruangan dibutuhkan saluran udara (*ducting*). Agar panas dari luar atau lingkungan tidak masuk dan mempengaruhi keadaan udara suplay, maka *ducting* yang digunakan haruslah di insulasi.

Kelebihan dari *all air system* adalah debit udara segar keruangan yang dapat dikontrol dan kelembaban udara ruanganpun juga bisa dikontrol. Akan tetapi karena AHU yang ada berfungsi untuk mendinginkan dan menyalurkan udara segar maka ukuran AHU dan *ducting* yang digunakan ukurannya harus besar, sesuai dengan kapasitas.

2.3 Proses *Subcooled*

Fungsi dari kondenser adalah merubah wujud refrigeran dari bentuk uap/gas menjadi refrigerant dengan bentuk cair. Proses perubahan dari gas ke cair ini dilakukan dengan membuang kalor yang ada pada refrigeran ke lingkungan sekitarnya pada suhu dan tekanan konstan. Dalam percobaan ini kalor dibuang dengan cara konveksi yaitu meniupkan udara yang mempunyai temperatur lebih rendah dari refrigerant melewati kondenser sehingga terjadi perpindahan kalor. Proses perpindahan kalor ini dimaksimalkan dengan adanya sirip-sirip pada kondenser dan aliran udara yang cukup dan bebas dari hambatan. Proses kondensasi atau perubahan dari wujud gas ke cair ini terjadi dialam pipa kondenser dan terjadi pada kondisi tekanan dan temperature tetap. Pada sistem refrigerasi yang telah dipelajari sebelumnya, proses kondensasi ini adalah proses dari titik 2 ke titik 3. Pada titik 3 idealnya seluruh refrigerant telah berujud cair jenuh (*saturated liquid*).

Jika perancangan dan pemilihan ukuran kondenser tidak tepat ataupun sirip-sirip condenser kotor maka pada ujung kondenser belum tentu semua refrigerant telah berbentuk cair. Suhu/temperatur pada waktu proses kondensasi ini terjadi masih lebih tinggi dari temperatur udara

disekitarnya. Oleh karena itu refrigerant yang mengalir keluar dari kondenser menuju kapiler melalui filter (*strainer*) akan mengalami proses perpindahan kalor yang akan menurunkan suhu refrigerant lebih rendah lagi dari suhu cair jenuhnya (*saturated liquid*). Proses penurunan suhu setelah melalui titik “*saturated liquid*” ini disebut proses subcooling dan wujud refrigerant disebut “*subcooled liquid*”. Daerah *subcooled liquid* ini terletak disebelah kiri dari kurva *saturated liquid* pada diagram p-h. Besarnya pendinginan lanjut yang terjadi di kondenser ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur kondensasi dengan temperatur yang terukur di akhir kondenser.

Contoh: Menentukan besarnya pendinginan lanjut di kondenser:

- Hasil pengukuran temperatur di pipa akhir kondenser = 43°C
- Tekanan kondenser 10,16 bar, refrigerant yang dipakai R-134a.

Dari table konversi didapat temperatur kondensor = 40°C

- Subcooled di kondensor

Temperatur kondensor – Temperatur pipa akhir kondensor

$43^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C} = 3\text{K}$ (nilai *subcooled* dinyatakan dengan satuan *absolute celcius* yaitu *Kelvin*)

2.4 Proses *Superheat*

Evaporator menyerap kalor pada ruangan yang didinginkan. Pada waktu refrigeran mendidih pada temperatur yang lebih rendah dari substansi yang didinginkan, refrigerant tersebut menyerap panas dari substansi tersebut. Evaporator akan menguapkan refrigeran cair ke bentuk gas. Pada akhir evaporator refrigeran sudah dalam bentuk gas sempurna. Tetapi karena gas refrigerant tersebut masih bertemperatur lebih rendah dari lingkungan sekitarnya membuat proses penyerapan kalor masih terjadi. Proses pemanasan lanjutan pada tekanan tetap setelah melampaui batas uap jenuh inilah yang disebut “*superheat*”. Proses ini terjadi pada berbagai lokasi dalam sistem refrigerasi, salah satu contoh adalah sebelum refrigeran masuk ke kompresor.

Proses *superheat* ini dimulai setelah refrigeran meninggalkan evaporator dan berlanjut sepanjang *suction line* sampai masuk ke kompresor. Refrigeran yang keluar dari kompresor sudah pasti mengalami *superheat* ini. Besarnya nilai *superheat* ini dihitung dengan cara mengurangi temperatur sebenarnya dengan temperatur saturasinya. Sedangkan temperatur saturasi diperoleh dari hasil konversi tekanan dimana pembacaan temperature dilakukan.

Contoh: Menentukan besarnya *superheat* di evaporator

- Hasil pengukuran temperatur di pipa akhir evaporator = 10°C
- Tekanan evaporator 4 bar, refrigeran yang dipakai R-134a.

Dari table konversi didapat temperatur evaporasi = 8,9°C

- *Superheat* di evaporator

Temperatur pipa akhir evaporator – Temperatur evaporasi

$10^{\circ}\text{C} - 8,9^{\circ}\text{C} = 1,1 \text{ K}$ (nilai *superheat* dinyatakan dengan satuan absolute celcius yaitu Kelvin) Pada p-h diagram, daerah disebelah kanan dari kurva uap/gas jenuh (*saturated vapour*) disebut daerah “*superheated region*”, pada daerah ini dapat dipastikan semua refrigeran berbentuk gas dengan temperatur yang lebih tinggi dari suhu uap jenuh (*saturated vapour temperature*)

2.5 Komponen Utama

Pada sistem refrigerasi kompresi uap terdapat empat komponen utama yang wajib digunakan. Jika salah satu komponen tidak ada / tidak digunakan, maka sistem tersebut tidak dapat bekerja sama sekali. Dengan menggunakan keempat komponen tersebut kita sudah dapat membuat suatu sistem refrigerasi kompresi uap yang sangat sederhana, tetapi sistemnya tidak dapat bekerja secara normal dan sempurna. Berikut ini adalah penjelasan tentang keempat komponen utama pada sistem refrigerasi kompresi uap.

2.5.1 Kompresor

Kompresor merupakan jantung dari sistem refrigerasi. Cara kerja kompresor adalah menghisap uap refrigeran yang bertekanan rendah dari evaporator dan mengkompresinya menjadi uap bertekanan tinggi sehingga uap akan tersirkulasi.



Gambar 2.3 kompresor

Kompresor berdasarkan konstruksinya terbagi menjadi 3, yaitu :

- a. Kompresor hermetik
- b. Kompresor semihmetik
- c. Kompresor open type

Kompresor berdasarkan cara kerjanya terbagi menjadi 5, yaitu :

- a. Kompresor torak (reciprocating)
- b. Kompresor putar (rotary)
- c. Kompresor helix (screw)
- d. Kompresor scroll
- e. Kompresor sentrifugal

2.5.2 Kondenser

Kondensor merupakan salah satu komponen utama dari sebuah mesin pendingin. Pada kondensor terjadi perubahan wujud refrigeran dari uap super-heated bertekanan tinggi ke cairan sub-cooled bertekanan tinggi. Agar terjadi perubahan wujud refrigeran (dalam hal ini adalah pengembunan/ condensing), maka kalor harus dibuang dari uap refrigeran.

Menurut media / zat yang mendinginkannya, kondensor dapat terbagi menjadi tiga macam, yaitu :

1. *Air-Cooled Condensor,*
2. *Water-Cooled Condensor,*
3. *Evaporative Condensor,*



Gambar 2.4 Kondensor

2.5.3 Evaporator

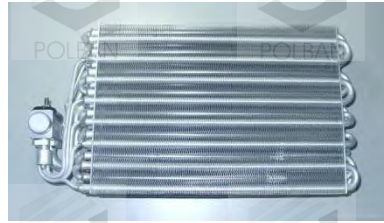
Pada evaporator, refrigeran menyerap kalor dari ruangan yang didinginkan. Penyerapan kalor ini menyebabkan refrigeran mendidih dan berubah wujud dari cair menjadi uap (kalor/panas laten).

Evaporator jika ditinjau dari segi konstruksinya dapat dikelompokkan menjadi :

1. Evaporator pipa telanjang (bare tube)
2. Evaporator permukaan pelat (plate surface)
3. Evaporator bersirip / rusuk-rusuk (finned)
4. Evaporator tabung dengan pipa (shell and tube)

Evaporator jika ditinjau dari cara kerjanya dapat dibagi menjadi dua :

1. Evaporator kering (dry or direct evaporator), terdiri dari pipa-pipa saja
2. Evaporator banjir (flooded evaporator), terdiri dari tabung dan pipa.



Gambar 2.5 Evaporator

2.5.4 Alat Ekspansi

Alat ekspansi yang digunakan adalah Pipa kapiler yang merupakan alat ekspansi cukup sederhana dan murah, karena konstruksinya hanya dibentuk oleh sebuah pipa kapiler berdiameter kecil dengan panjang tertentu sesuai beban yang akan didinginkan.



Gambar 2.6 Alat Ekspansi (pipa kapiler)

2.6 Komponen Pendukung Mekanik

2.6.1 Thermostat

Thermostat berfungsi sebagai pengatur temperatur pada kabin atau ruangan yang didinginkan agar dapat dipertahankan pada temperature yang diinginkan dengan batasan yang diinginkan (diferensial). Cara kerja thermostat sama dengan HLP, tetapi yang dijaganya bukan tekanan, melainkan temperature. Ketika temperature kabin sudah mencapai batas bawah diferensialnya, maka saklar pada termostat akan membuka dan memutuskan aliran arus listrik. Ketika temperature kabin mencapai batas atas diferensialnya, maka saklar akan menutup dan listrik kembali mengalir pada sistem.



Gambar 2.7 Thermostat

2.6.2 Pressure gauge

Pressure gauge atau disebut juga manifold gauge, adalah alat bantu mekanik yang berfungsi sebagai penunjuk tekanan kerja pada sistem namun tekanan yang diukur bukanlah tekanan absolute melainkan adalah *tekanan gage*. Manifold gauge ini terdiri dari dua jenis, yaitu High pressure gauge dan Low pressure gauge.



Gambar 2.8 Pressure gauge

2.7 Komponen Pendukung Kelistrikan

2.7.1 MCB (Mini Circuit Breaker)

MCB adalah alat yang digunakan untuk menjaga sistem dari beban yang berlebih atau menjaga sistem kelistrikan dari hubungan singkat arus listrik. Jika terjadi beban yang berlebih atau hubungan singkat, maka MCB akan memutus aliran listrik dari sumber.



Gambar 2.8 MCB (Mini Circuit Breaker)

2.7.2 Volt-meter

Sesuai namanya, Volt-meter berfungsi sebagai pengukur besarnya tegangan listrik pada rangkaian. Volt-meter dirangkai parallel dengan beban.



Gambar 2.10 Volt meter

2.7.3 Ampere-meter

Sesuai namanya, Ampere-meter berfungsi sebagai pengukur besarnya arus listrik yang mengalir pada rangkaian. Ampere-meter dirangkai seri dengan beban.



Gambar 2.11 Ampere meter

2.7.4 Kontaktor

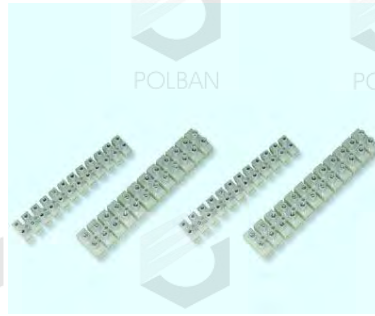
Adalah komponen listrik yang digunakan untuk mengalirkan listrik ke beban.



Gambar 2.12 Kontaktor

2.7.5 Junction Terminal

Adalah sebagai penghantar arus listrik dari dan menuju alat-alat kontrol. Alat ini memudahkan kita untuk menghubungkan kabel yang terlalu banyak jumlahnya.



Gambar 2.13 Junction Terminal

2.7.6 Pilot Lamp

Adalah indikator apakah sistem yang dirangkai parallel dengan Pilot Lamp sudah bekerja atau belum.



Gambar 2.14 Pilot Lamp

2.8 Teori Perhitungan Panjang Pipa Evaporator

Persamaan-persamaan yang digunakan untuk menghitung panjang pipa evaporator adalah persamaan untuk perpindahan kalor jenis konveksi bebas.

Pada evaporator terjadi transfer energi antara permukaan pipa yang memiliki temperatur sama dengan refrigeran didalamnya dengan lapisan film antara dengan udara didalam kabin. Untuk menentukan panjang pipa evaporator, dapat diketahui dengan mengetahui kapasitas pendinginan yang dibutuhkan, temperatur awal dan temperatur kabin pada rancangan yang diinginkan, dan diameter pipa evaporator yang akan digunakan.

Untuk perhitungan panjang pipa *evaporator*, diasumsikan:

$$T_s = \frac{T_k - T_a}{2} \dots\dots\dots(10)$$

$$T_w = T_k - ETD \dots\dots\dots(11)$$

$$T_f = \frac{T_w + T_s}{2} \dots\dots\dots(12)$$

dengan:

T_s = Temperatur *Surrounding* / udara di kabin (K)

T_w = Temperatur *wal* // permukaan pipa (K)

T_f = Temperatur *film* antara permukaan pipa dengan udara kabin (K)

Dari tabel sifat-sifat propertis udara (Holman) didapat harga-harga berikut untuk nilai T_f dengan menggunakan interpolasi data:

$$\rho = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \qquad k = \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}$$

$$\mu = \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \qquad C_p = \frac{\text{Kj}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \qquad v = \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Dengan demikian dapat diketahui bilangan *Reynolds*.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \dots\dots\dots(13)$$

Dengan:

Re_e = bilangan *Reynolds*

ρ = densitas fluida (Kg/m³)

v = kecepatan fluida (m/s)

d = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik (Kg/m.s)

dengan mengetahui bilangan *Reynolds*, maka diperoleh C dan nilai n dari Tabel 2.1

Tabel 2.1 harga konstanta C dan n [J.P. Holman 1988]

Re	C	n
0,4 - 4	0,989	0,330

4 - 40	0,911	0,385
40 - 4000	0,683	0,466
4000 - 40000	0,193	0,618
40000 - 400000	0,0266	0,805

Setelah itu dapat diketahui bilangan *nusselt* dari aliran fluida menyilang silinder untuk konveksi paksa:

$$Nu = C \cdot (Re)^n \cdot Pr^{1/3} \dots\dots\dots(14)$$

Dengan:

N_u = bilangan *nusselt*

C, n = konstanta

Re = bilangan *Reynolds*

Pr = bilangan *prandlt*

Dengan demikian dapat diketahui koefisien perpindahan kalor dari fluida

$$h = \frac{Nu \cdot k}{d} \dots\dots\dots(15)$$

dimana:

h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

N_u = bilangan *nusselt*

k = konduktivitas termal ($W/m \cdot ^\circ C$)

d = diameter pipa (m)

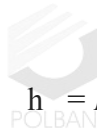
setelah itu panjang pipa evaporator dapat dihitung dengan persamaan:

$$\frac{q}{L} = \frac{\Delta T \cdot \pi}{\frac{1}{d_o \cdot h_o} + \frac{Ln \frac{r_o}{r_i}}{2k} + \frac{1}{d_i \cdot h_i}} \dots\dots\dots(16)$$

Dimana:

L = Panjang pipa *evaporator* (m)

Q_e = Kapasitas pendinginan (watt)



h = Koefisien perpindahan kalor ($\frac{W}{m^2 K}$)

π = phi (3,14)

d = Diameter pipa *evaporator* (m)



$\Delta T = T_s - T_w$ (K)

r = Jari – jari pipa *evaporator*

