

BAB 2

TEORI DASAR

2.1. Sistem refrigerasi mekanik kompresi uap

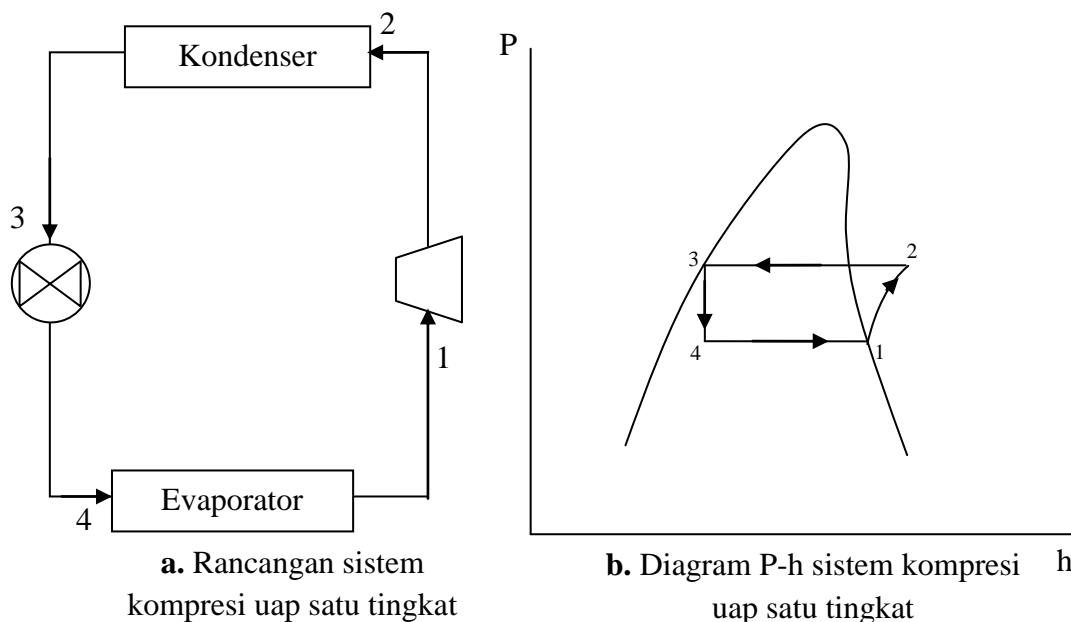
SRMKU mengambil keuntungan saat fluida yang memiliki tekanan yang cukup tinggi bisa menjadi lebih dingin jika tekanan diturunkan. Namun, jika perubahan tekanan yang terjadi sangat besar, maka jika gas dimampatkan maka gas yang mengalami tekanan tersebut akan menjadi lebih panas dibandingkan dengan lingkungannya. Dalam sistem refrigerasi, yang dimanfaatkan adalah penyerapan kalor dari lingkungan ke reservoir lalu panas yang didapatkan tersebut dikeluarkan ke lingkungan luar.

Refrigerasi biasanya dilakukan dengan beberapa cara diantaranya adalah sistem refrigerasi mekanik kompresi uap, sistem absorpsi, dan sistem kompresi gas. Namun, yang akan digunakan pada sistem refrigerasi ini adalah sistem refrigerasi mekanik kompresi uap.

2.1.1. Sistem refrigerasi *single stage compression*

Sistem refrigerasi *single stage compression* adalah sistem refrigerasi yang merupakan pendekatan dari sistem refrigerasi dari sistem Carnot yang merupakan sistem yang ideal. Komponen utama dari sistem refrigerasi ini terdiri dari kondenser, kompresor, katup expansi, dan evaporator. Dalam sistem mekanik kompresi uap yang ideal, refrigeran memasuki kompresor sebagai uap superheated pada tekanan rendah. Setelah itu, refrigeran akan meninggalkan kompresor dan kemudian masuk ke dalam kondenser sebagai uap dengan tekanan yang telah dinaikkan oleh compressor. Di dalam kondenser, refrigeran akan mengalami kondensasi akibat pelepasan kalor dari refrigeran ke lingkungan ataupun ke air pendingin. Selanjutnya, refrigeran akan meninggalkan kondenser dengan keadaan cair dan bertekanan tinggi. Tekanan pada refrigeran kemudian akan diturunkan melalui katup ekspansi sehingga akan ada sejumlah cairan refrigeran yang berubah menjadi uap dingin. Refrigeran yang bersuhu rendah tersebut akan berada pada tekanan rendah ketika keluar dari katup ekspansi.

Kemudian refrigeran akan kembali masuk kedalam evaporator yang kemudian akan mengambil kalor dari beban kalor, dan selanjutnya akan kembali lagi ke dalam kompresor. Sistem refrigerasi *single stage* hanya memiliki 2 tekanan yaitu tekanan tinggi dan tekanan rendah, sehingga hanya membutuhkan 1 buah katup ekspansi dan juga 1 buah kompresor. Sistem refrigerasi *single stage* ini digambarkan seperti pada **Gambar 2.1**



Gambar 2.1. Sistem kompresi uap satu tingkat

Pada proses 1-2, Refrigeran melewati kompresor sehingga entalpi dan tekanan pada refrigeran meningkat. Pada titik 1 refrigeran dalam keadaan uap jenuh sedangkan pada titik 2 dalam keadaan uap *superheated*.

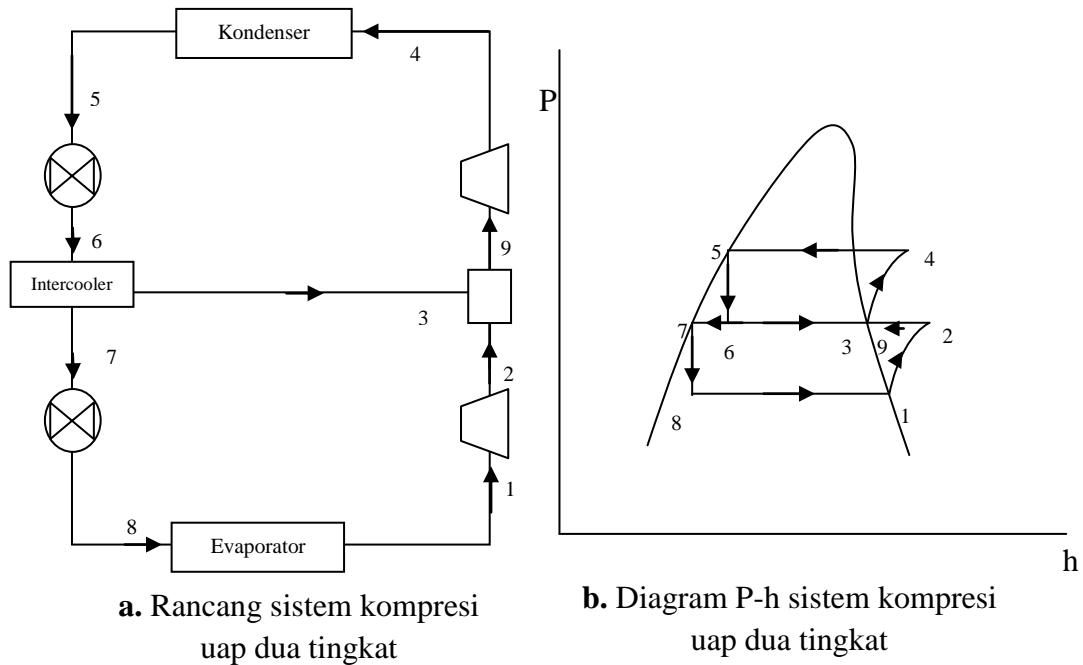
Pada proses 2-3, Refrigeran melewati kondenser dan akan melepaskan kalor ke lingkungan sehingga entalpi pada refrigeran berkurang. Keluaran refrigeran dari kondenser akan berbentuk cair jenuh.

Pada proses 3-4, refrigeran masuk ke dalam katup ekspansi sehingga tekanan dan suhu pada refrigeran akan turun.

Pada proses 4-1, refrigeran masuk ke dalam evaporator dan akan mengambil kalor dari ruang pendingin sehingga entalpi dari refrigeran akan meningkat. Keluaran refrigeran dari evaporator akan berbentuk uap jenuh.

2.1.2. Sistem refrigerasi *multi stage compression*

Beberapa aplikasi dari industri membutuhkan suhu yang sangat rendah, sehingga sulit bagi sistem kompresi uap satu tingkat untuk mampu menurunkan suhu dengan *range* suhu yang sangat besar dengan suhu lingkungan. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut maka diperlukan sebuah sistem refrigerasi yang memiliki 2 atau lebih siklus refrigerasi. Sistem ini disebut sistem refrigerasi *multi stage compression*.



Gambar 2.2. Sistem kompresi uap dua tingkat

Pada proses 1-2 refrigeran melewati kompresor sehingga tekanan dan entalpi yang dimiliki refrigeran bertambah.

Proses 2-9 terjadi penyatuhan dengan uap refrigeran yang berasal dari *flash chamber* dengan cairan refrigeran dari kompresor.

Proses 9-4 terjadi penambahan tekanan oleh kompresor sehingga entalpi dan tekanannya bertambah.

Proses 4-5 terjadi pengambilan kalor dari kondenser ke lingkungan sehingga entalpi yang dimiliki oleh refrigeran berkurang.

Proses 5-6 terjadi penurunan tekanan oleh *control valve* sehingga tekanan yang dimiliki oleh refrigeran turun.

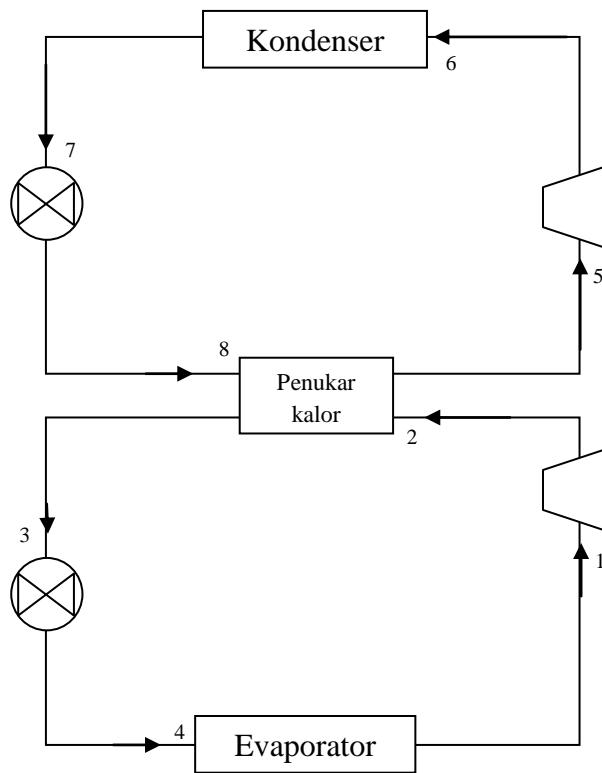
Proses 6-7 terjadi pemisahan fasa. Fasa gas akan menuju ke proses 3 sedangkan cairan refrigeran akan masuk ke 7.

Proses 7-8 terjadi lagi penurunan tekanan oleh *control valve* sehingga tekanan refrigeran turun.

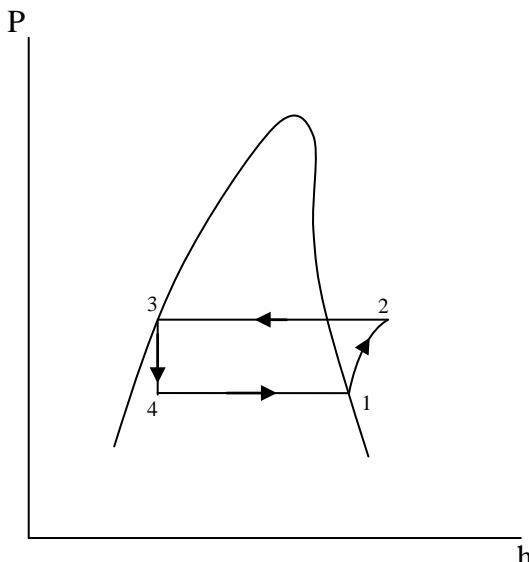
Proses 8-1 terjadi pengambilan panas dari luar oleh refrigeran sehingga entalpi yang dimiliki oleh refrigeran bertambah.

2.1.3. Sistem refrigerasi *cascade*

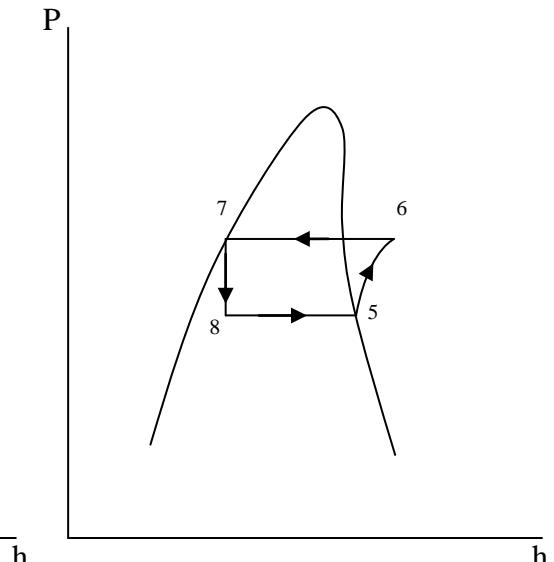
Sistem refrigerasi *cascade* merupakan modifikasi dari sistem refrigerasi *multi stage*. Perbedaannya terletak pada refrigeran yang digunakan. Sistem refrigerasi *cascade* menggunakan 2 jenis refrigeran yang berbeda. Perbedaan lainnya terletak pada penggantian *flash chamber* menjadi penukar kalor sehingga tidak ada pencampuran refrigeran antara refrigeran yang bekerja pada daerah bertekanan tinggi dengan refrigeran yang bekerja pada daerah bertekanan rendah. Penentuan jenis refrigeran pada tiap daerah tekanan bergantung pada titik didih masing-masing refrigeran. Refrigeran yang memiliki titik didih yang lebih rendah, daerah kerjanya adalah pada tekanan rendah dan refrigeran yang memiliki titik didih yang lebih tinggi bekerja pada daerah bertekanan tinggi.



a. Rancangan sistem kompresi uap *cascade*.



b. Diagram P-h pada refrigeran tekanan rendah.



c. Diagram P-h pada refrigeran tekanan tinggi.

Gambar 2.3. Sistem kompresi uap *cascade*.

Pada proses 1-2, Refrigeran pada daerah kerja tekanan rendah masuk ke dalam kompresor dalam keadaan uap jenuh, dan keluar dari kompresor dalam bentuk uap *superheated*.

Pada proses 2-3, kalor yang dimiliki oleh refrigeran bertekanan rendah akan dibuang lewat penukar kalor menuju refrigeran lain yang bekerja di daerah bertekanan tinggi.

Pada proses 3-4, uap yang keluar dari penukar kalor kemudian akan masuk ke dalam katup ekspansi sehingga tekanannya turun dengan entalpi yang tetap dan suhu menjadi dingin.

Pada proses 4-1, refrigeran yang dingin tersebut akan masuk ke dalam evaporator untuk mengambil kalor dari ruang pendingin.

Pada proses 5-6, refrigeran pada daerah kerja tekanan tinggi masuk ke dalam kompresor dalam bentuk uap jenuh sehingga pada refrigeran naik dan keluar dalam bentuk uap superheated.

Pada proses 6-7, kalor yang dimiliki refrigeran tersebut akan dilepaskan ke lingkungan melalui kondenser sehingga suhu turun dan refrigeran akan keluar dari kondenser dalam bentuk cair jenuh.

Pada proses 7-8, refrigeran masuk ke dalam katup ekspansi sehingga tekanan dan suhu akan turun dan entalpi tetap.

Pada proses 8-1, refrigeran akan mengambil kalor dari penukar kalor sehingga entalpi akan meningkat.

2.2. Kompressor

Kompressor adalah mesin yang digunakan untuk menaikkan tekanan pada refrigeran dan juga alat untuk memompa refrigeran agar terus bersirkulasi di dalam sistem. Kenaikan tekanan refrigeran setelah melalui kompresor mengakibatkan tekanan yang keluar dari kompresor atau yang akan melewati kondenser akan menjadi lebih tinggi dibandingkan dengan tekanan yang akan

melewati evaporator. Kompresor merupakan alat yang sangat penting dalam sistem refrigerasi karena kemampuan suatu sistem refrigerasi dalam menurunkan suhu sangat bergantung pada kemampuan kompresor untuk memenuhi banyaknya refrigeran yang butuh di sirkulasi.

2.3. Evaporator

Evaporator adalah sebuah alat penukar kalor yang cara kerjanya adalah refrigeran dimanfaatkan sebagai media untuk memindahkan kalor dari ruang produk yang sedang didinginkan lalu refrigeran tersebut akan membawa kalor yang telah dibawa refrigeran untuk dibuang ke lingkungan melalui kondenser.

2.4. Teori perpindahan kalor

Perpindahan kalor terjadi bila suatu benda terdapat perbedaan suhu. Perpindahan energi ini terjadi dari bagian yang memiliki suhu yang tinggi ke suhu yang rendah. Dalam perpindahan kalor, terdapat tiga cara perpindahan kalor yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Perpindahan kalor konduksi pada pipa silinder, perpindahan kalor secara konveksi, koefisien kalor konveksi dan konduksi akan dijelaskan dalam subbab berikut.

2.4.1. Perpindahan kalor konduksi

Perpindahan kalor konduksi terjadi bila ada beda suhu antara 2 benda yang dihubungkan dengan media padat. Pada peristiwa konduksi, energi dipindahkan dengan perantaraan getaran pada molekul tanpa adanya perpindahan tempat. Perpindahan kalor secara konduksi secara sederhana dapat dituliskan sebagai

$$q = -k A \left(\frac{dt}{dx} \right) \quad (2.1)$$

dimana:

q = besar perpindahan kalor konduksi (Watt)

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

A = luas permukaan kontak perpindahan kalor (m^2)

Δt = beda temperatur ($^\circ C$)

dx = ketebalan benda (m)

2.4.2. Perpindahan kalor konveksi

Perpindahan kalor konveksi terjadi bila ada perbedaan suhu antara permukaan padat dengan cairan atau gas. Laju perpindahan kalor konveksi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$q = h A (\Delta t) \quad (2.2)$$

dimana:

q = besarnya perpindahan kalor konveksi (Watt)

h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($\frac{W}{m \cdot K}$)

A = luas perpindahan kalor (m^2)

Δt = beda temperatur ($^\circ C$)

Perpindahan kalor secara konvesi dibagi menjadi dua jenis, yaitu konveksi paksa dan konveksi alami. Pada konveksi paksa, kecepatan angin perlu dicari dengan menggunakan persamaan:

$$\dot{m} = v \times (l \times t) \quad (2.3)$$

\dot{m} = debit aliran udara pada kompartemen ($\frac{m^3}{s}$)

v = kecepatan udara pada kompartemen ($\frac{m}{s}$)

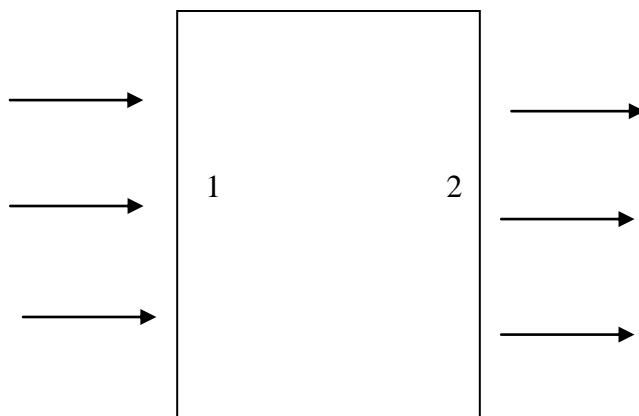
t = tinggi ruang kosong pada kompartemen (m)

$$l = \text{lebar ruang pendingin (m)}$$

Untuk mengevaluasi koefisien perpindahan kalor konvesi paksa, dapat digunakan beberapa parameter yaitu bilangan Reynoldss, Prandtl, dan Nusselt. Sedangkan, untuk mengevaluasi koefisien perpindahan kalor secara konveksi alami dapat digunakan parameter bilangan Rayleigh[6]:

$$Ra_l = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)}{\alpha v} \quad (2.4)$$

2.4.3. Perpindahan kalor pada pelat datar



Gambar 2.4. Perpindahan kalor pada pelat datar

Perpindahan kalor pada pelat datar terdiri dari perpindahan kalor secara konveksi dan konduksi. Pada **Gambar 2.4** pada sisi 1, perpindahan kalor konveksinya:

$$q = h_1 A_i (T_a - T_i)$$

Untuk perpindahan kalor konduksi,

$$q = -k A \frac{dt}{dx}$$

Setelah di integrasikan, maka:

$$q = -k \frac{A}{x} (T_o - T_i) \quad (2.5)$$

Pada sisi 2 perpindahan kalor konveksi:

$$q = h_2 A_o (T_o - T_b)$$

Nilai koefisien perpindahan kalor total adalah

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{dx}{k} + \frac{1}{h_2}} \quad (2.6)$$

Sehingga perpindahan kalor secara menyeluruh adalah

$$q = \frac{T_a - T_b}{\frac{1}{h_1 A_i} + \frac{dx}{k \cdot A} + \frac{1}{h_2 A_o}} \quad (2.7)$$

dimana:

$h_{1,2}$ = koefisien konveksi udara pada sisi 1 dan 2 (kJ/kg)

$A_{1,2}$ = luas plat sisi udara 1 dan 2 (m^2)

k = koefisien konduksi ($\frac{\text{W}}{\text{m K}}$)

A = luas plat keseluruhan (m^2)

2.5. Koefisien konveksi refrigeran pada pipa *exchanger*

Pada pipa evaporator, terdapat aliran refrigeran dengan suhu tertentu yang digunakan untuk menghitung koefisien konveksi refrigeran. Hubungan antara bilangan Nusselt, Reynolds, dan Prandtl dinyatakan dalam persamaan Dittus-Boelter yaitu:

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad (2.8)$$

dengan syarat

$$0,7 < Pr < 160$$

$$Re > 2200$$

$$L/D > 60$$

$n = 0,4$ untuk pendinginan, $n = 0,3$ untuk pemanasan

di mana:

$$Pr = \mu \cdot \frac{C_p}{k} \quad (2.9)$$

$$Re = \rho \cdot u \cdot \frac{D}{\mu} \quad (2.10)$$

dengan

$D = \text{diameter Pipa (m)}$

$u = \text{Kecepatan aliran (m/s)}$

Sehingga koefisien konveksi refrigeran adalah

$$h = \frac{Nu \cdot k}{D} \quad (2.11)$$

2.6. Koefisien konveksi udara pada pipa *exchanger*

Kecepatan udara yang melewati penukar kalor memiliki kecepatan massa sebesar:

$$G = \frac{m}{A_{min}} \quad (2.12)$$

di mana:

$m = \text{total laju aliran massa dari fluida (kg/s)}$

$A_{min} = \text{luas aliran minimum dari laju aliran bebas (m}^2\text{)}$

Bilangan Reynolds dari udara kemudian dapat dicari dengan menggunakan persamaan:

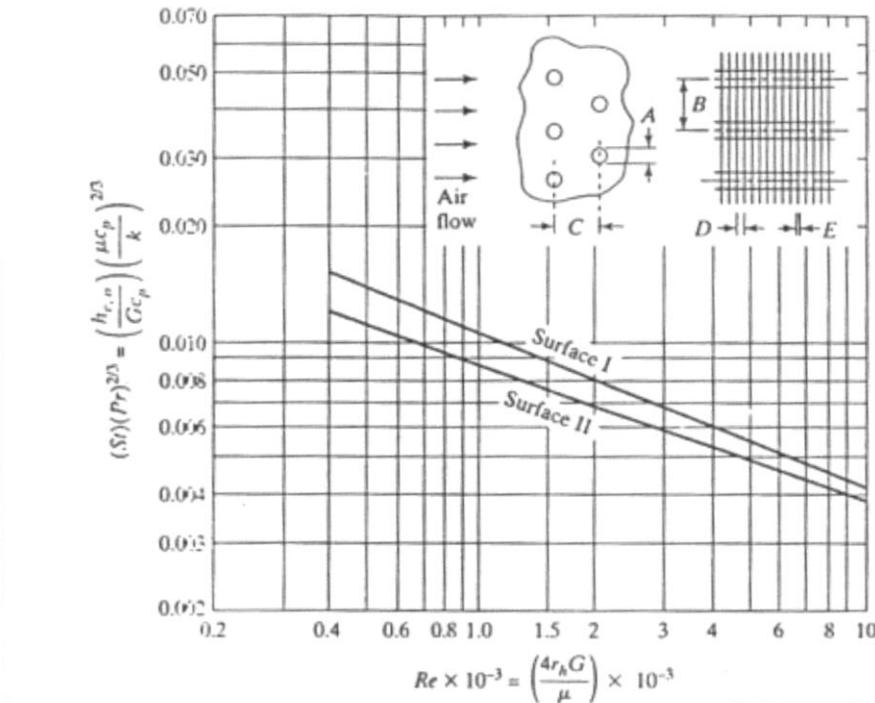
$$Re = G \frac{Dh}{\mu} \quad (2.13)$$

di mana:

$D_h = \text{diameter hidraulik (m)}$

Diameter hidraulik pada penampang persegi, dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$D_h = 4 \frac{A_{min}}{A} \quad (2.14)$$



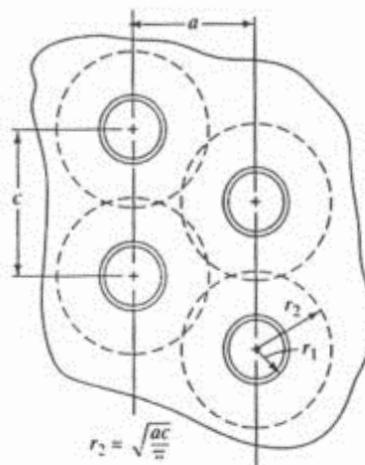
Gambar 2.5. Korelasi antara perpindahan kalor permukaan luar silinder[8].

Berdasarkan **Gambar 2.5**, maka dapat diketahui nilai h_{udara} , yaitu:

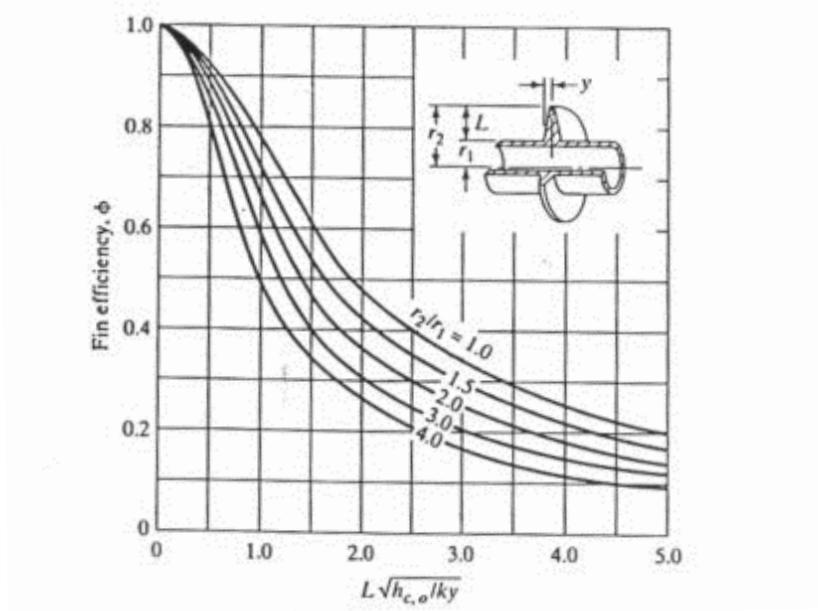
$$h = \frac{Re \cdot G \cdot Cp}{Pr^2} \quad (2.15)$$

2.7. Efisiensi sirip

Untuk mencari nilai dari efiseinsi sirip, dapat dilakukan dengan menggunakan **Gambar 2.6** dan **Gambar 2.7**



Gambar 2.6. Metode pendekatan untuk mencari keseragaman ketebalan pada fin plat datar[8].



Gambar 2.7. Grafik efisiensi dari plat silinder[8].

2.8. Perpindahan kalor total

Koefisien perpindahan kalor total pada penukar kalor dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_{ref} \cdot (\frac{A_r}{A_u})} + \frac{D_i \cdot \ln(\frac{D_o}{D_i})}{2k \cdot (\frac{A_r}{A_u})} + \frac{1}{h_{udara} \cdot \eta} \quad (2.16)$$

dimana:

$$A_r = \text{luas total aliran refrigeran (m}^2\text{)}$$

$$A_u = \text{luas total aliran udara (m}^2\text{)}$$

untuk mencari nilai dari perpindahan kalor total adalah

$$q = U \cdot A \cdot \Delta t \cdot \frac{1}{\eta} \quad (2.17)$$