

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Pengerinan Vanili

Pengerinan vanili dimulai dengan pemisahan polong vanili dari batang polong, kemudian dicuci bersih dari kotoran yang menempel. Kemudian disortir berdasarkan panjang, ketebalan, kerusakan dan polong cacat. Buah vanili yang telah disortir harus segera diolah. Proses pengolahan polong vanili ada 4 tahap yaitu : 1) pelayuan, 2) pemeraman dan pengerinan, 3) pengerinan-anginan, dan 4) penyimpanan (conditioning).

2.1.1. Pelayuan

Tujuan dari pelayuan adalah untuk menghentikan pertumbuhan vegetatif dan mendorong aktivitas enzim pembentuk vanili. Mula-mula air dimasak pada wadah/drum yang terbuat dari besi atau stainless steel (Gambar 2.1). Setelah suhu air mencapai 63 – 65 °C celupkan polong vanili dengan menggunakan wadah yang terbuat dari plat besi berlubang atau anyaman kawat atau keranjang bambu. Lamanya pencelupan tergantung pada ukuran polong, untuk polong yang besar dan utuh berkisar antara 2,0 – 2,5 menit, sedangkan untuk polong lebih kecil kurang dari 2 menit

2.1.2. Pemeraman dan Pengerinan

Setelah dilayukan polong vanili ditiriskan kemudian dimasukkan ke dalam tempat pemeraman selama 24 jam. Tempat pemeraman dibuat dari peti kayu ber dinding ganda. Di antara kedua dinding tersebut dimasukkan sabut kelapa atau serbuk gergaji yang berfungsi sebagai isolator agar suhu dapat dipertahankan antara 38 – 40o C. Selain itu untuk meningkatkan daya isolator dan untuk menyerap air yang keluar dari polong vanili maka bagian dalam kotak dilapisi dengan kain yang agak tebal. Apabila setelah ditiriskan suhu polong vanili kurang dari 38–40o C maka perlu dilakukan penjemuran/pemanasan awal selama 3 jam sebelum diperam. Kemudian dibungkus dengan kain hitam. Tujuan pemeraman adalah agar terjadi reaksi enzimatik pada polong vanili untuk pembentukan vanili. Setelah pemeraman awal polong vanili berubah warna menjadi kecoklatan dan berminyak.

Selanjutnya polong dikeringkan dengan cara dijemur. Polong ditaruh di atas rak bambu atau sejenisnya yang beralaskan kain hitam selama 2,0 – 2,5 jam dan dibolak-balik sebanyak 3 – 4 kali. Kemudian tutup dengan kain hitam dan penjemuran diteruskan sampai sore hari. Selesai penjemuran polong vanili dalam keadaan panas segera digulung dengan kain yang sama selanjutnya dimasukkan ke dalam kotak pemeraman dan disimpan diruangan yang kering. Selama proses pemeraman dan pengeringan apabila ada polong yang berjamur maka dibersihkan secara hati-hati dengan menggunakan kapas atau kain halus yang dibasahi air panas atau alkohol. Setelah mengalami proses pemeraman dan pengeringan polong vanili akan beraroma vanilin yang tajam.



Gambar 2.1. Drum *stainless steel* untuk pelayuan polong vanili dan pengering-anginan

Sumber: <http://www.disbun.jabarprov.go.id/data/arsip/Panili.pdf>.

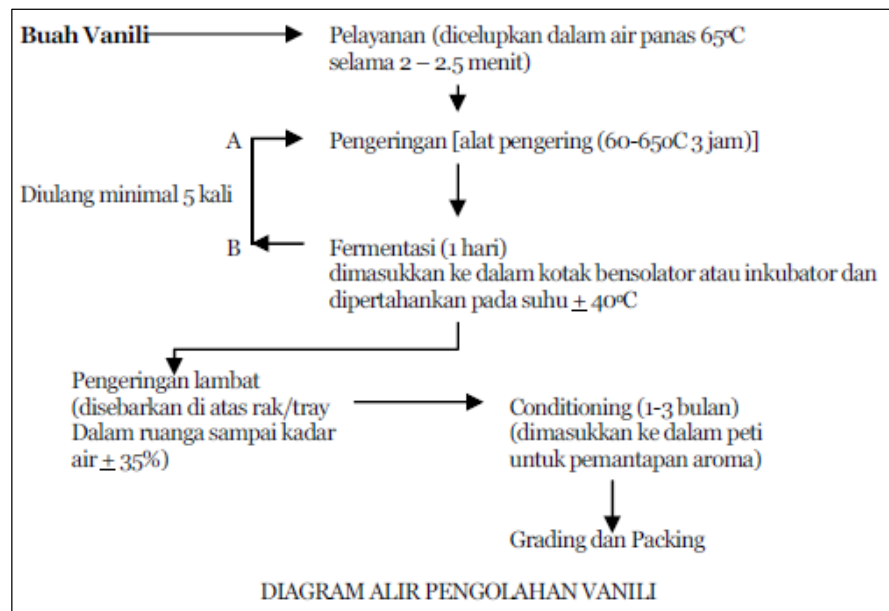
2.1.3. Pengering-anginan

Pengering-anginan bertujuan untuk menurunkan kadar air secara perlahan dan meningkatkan aroma vanili. Polong vanili disusun pada rak bambu/kawat dan disimpan dalam ruangan selama 30 – 45 hari. Ruang tempat penyimpanan harus kering, bersih, sejuk dan berventilasi. Polong vanili diperiksa secara rutin dan yang sudah cukup kering (kadar air 30 – 35%) dikeluarkan dari rak untuk diproses selanjutnya.

2.1.4. Penyimpanan

Tujuan penyimpanan adalah untuk penyempurnaan atau pemantapan aroma. Proses penyimpanan dilakukan oleh pihak pembeli/pengelola vanili.

Proses ini merupakan tahap akhir dari pengolahan polong vanili sebelum di ekspor atau dikelola sebagai bahan industri. Polong-polong vanili diikat dengan tali sebanyak 50-100 potongan perikat. Kemudian masing-masing ikatan dibungkus dengan kertas minyak atau kertas parafin. Selanjutnya dimasukkan ke dalam peti yang dilapisi kertas minyak. Peti tersebut kemudian disimpan di ruangan yang sejuk dan kering. Penyimpanan ini dilakukan selama 2-3 bulan. Secara rutin dilakukan pemeriksaan untuk melihat adanya serangan jamur. Polong yang terserang jamur segera dibersihkan dengan kapas atau kain halus yang dibasahi alkohol. Polong yang kurang atau tidak keluar aromanya dijemur dan diperam kembali. (Dinas Perkebunan Jawa Barat,2007)



Gambar 2.2. Diagram alir pengolahan vanili

Sumber: <http://www.disbun.jabarprov.go.id/data/arsip/Panili.pdf>.

2.1.5. Standar Mutu

Standar mutu Di pasaran internasional harga vanili ditentukan oleh mutunya. Setiap negara pengimpor menetapkan persyaratan mutu yang berlainan. Pasar di Amerika Serikat lebih memerlukan vanili berkadar air rendah (20 – 25%) karena digunakan untuk bahan baku industri ekstraksi. Pasar di Eropa yang umumnya untuk dikonsumsi langsung oleh rumah tangga menghendaki vanili

utuh (berpenampilan baik), kadar vanilin tinggi, beraroma tajam dan kadar air 30 – 35%. Secara nasional telah ditetapkan oleh Dewan Standarisasi Nasional dengan nama Standar Nasional Indonesia (SNI) (Tabel 2.1a dan 2.1b). Sedangkan International Standar Organisation (ISO) telah menetapkan spesifikasi vanili yang diperdagangkan di pasaran dunia (Tabel 2.1)

Tabel 2.1a. Syarat umum vanili menurut SNI 01-0010-1990

Karakteristik	Syarat mutu	Cara pengujian
Bau	Wangi khas vanili	Organoleptik
Warna	Hitam mengkilat, hitam kecoklatan mengkilat sampai coklat	Visual
Polong	Penuh berisi, berminyak, lentur sampai agak kaku dan kurang kaku	Organoleptik
Benda asing	Bebas	Visual
Kapang	Bebas	Visual

Sumber: Standar mutu cengkeh SNI 01-0010-1990 (1990)

Keterangan tabel :

- Buah polong vanili yang cukup tua adalah yang berwarna kekuning-kuningan dengan ujung menguning
- Polong utuh yang pecah adalah vanili yang disajikan dalam bentuk utuh, tetapi pecah lebih dari ¼ ukuran panjang
- Benda asing adalah bahan-bahan baku vanili, seperti ranting, batu, tanah, bagian tubuh serangga dan lain-lain yang terikut polong
- Kapang adalah vanili yang ditumbuhi/diserang oleh kapang yang dapat dilihat oleh mata biasa
- Polong utuh yang terpotong adalah polong vanili yang bagian ujungnya terpotong sebagian tetapi persyaratan panjang minimumnya masih terpenuhi.

2.1.6. Suhu Pengeringan Vanili

Suhu ekstraksi (suhu pengeringan) vanili dianjurkan untuk tidak melebihi suhu ekstraksi vanili maksimum karena dapat menyebabkan degradasi flavor vanili. Sebaliknya, suhu yang terlalu rendah dapat mengakibatkan bloking reaksi yang diinginkan. Suhu ekstraksi vanili pada umumnya antara 10 sampai 60⁰C dan disukai antara 30 sampai 40⁰C (Brunerie 1998). Menurut Purseglove et al. (1981),

suhu 38-49⁰C dapat meningkatkan ekstraksi vanili tanpa merusak flavor. Oleh sebab itu, berdasarkan percobaan pada tahap ini ditetapkan bahwa suhu optimum untuk aktifitas enzim β -glukosidase adalah 50⁰C dan untuk tahapan penelitian berikutnya, penambahan enzim β - glukosidase diaplikasikan pada suhu tersebut. (Yayasan Demandri, 2007)

Tabel 2.1b. Syarat khusus vanili menurut SNI 01-0010-1990

Karakteristik	Syarat				Cara pengajuan
	Mutu 1A	Mutu 1B	Mutu II	Mutu III	
Bentuk	Utuh	Utuh	Utuh/di-potong 8	Utuh/di-potong 8	Visual
Ukuran polong utuh, min (cm)	11	11			SP-SMP-320-1980
Ukuran polong dipotong-potong	Tidak ada	Tidak ada	Tidak disyaratkan	Tidak disyaratkan	SP-SMP-320-1980
Polong utuh yang pecah dan terpotong, maks. b/b (%)	5	Tidak disyaratkan	Tidak disyaratkan	Tidak disyaratkan	SP-SMP-320-1980
Kadar air maks. b/b (%)	38	38	30	25	SP-SMP-7-1975
Kadar vanilin min. b/b kering (%)	2,25	2,25	1,50	1,00	SP-SMP-320-1980
Kadar abu maks. b/b kering (%)	8	8	9	10	SP-SMP-35-1975

Sumber: Standar mutu cengkeh SNI 01-0010-1990 (1990)

Tabel 2.2. Standar mutu vanili menurut ISO 5565 – 1982

Bentuk polong	Spesifikasi
1. Utuh : Kategori 1 - <i>A₁ non-split</i>	Semua polong vanili utuh, tidak ada yang terpotong atau pecah, mengkilat, penuh berisi dan elastis. Aroma khas vanili, warnanya seragam dari coklat sampai gelap dan bebas dari noda. Kadar air maksimum 38%
- <i>B₁ split</i>	Karakteristik polong vanilinya sama dengan persyaratan A ₁ tetapi bentuknya sudah pecah polongnya.
Kategori 2 - <i>A₂ non-split</i>	Semua polong vanili utuh, tidak ada yang terpotong atau pecah, mengkilat, penuh berisi dan elastis. Aroma khas vanili, warnanya seragam dari coklat sampai coklat gelap. Boleh terdapat sedikit polong vanili yang ternoda, tetapi panjang total noda tidak boleh melebihi 1/3 dari panjang polong vanili. Kadar air maksimum 38%
- <i>B₂ split</i>	Karakteristik polong vanili seperti persyaratan A ₂ tetapi bentuknya polongnya sudah pecah.
Kategori 3 - <i>A₃ non-split</i>	Semua polong vanili utuh, tidak ada yang terpotong atau pecah, mengkilat, penuh berisi dan elastis. Aroma khas vanili, warnanya seragam dari coklat sampai coklat gelap. Boleh terdapat banyak polong vanili yang bernoda, tetapi panjangnya tidak boleh lebih dari 1/2 panjang polong. Boleh juga terdapat filamen merah pada polong tetapi panjangnya tidak boleh lebih dari 1/3 panjang polong. Kadar air maksimum 30%
- <i>B₃ split</i>	Karakteristik polong vanili sama dengan persyaratan A ₃ tetapi bentuknya sudah pecah polongnya.
Kategori 4 - <i>A₄ non-split</i>	Semua polong vanili utuh, tidak ada yang terpotong atau pecah, penuh berisi, kering (kaku). Aroma khas vanili, warna agak kemerahan dan boleh terdapat beberapa noda tetapi panjangnya tidak boleh lebih dari 1/2 panjang polong. Kadar air maksimum 25%
- <i>B₄ split</i>	Karakteristik polongnya sama dengan persyaratan A ₁ tetapi polongnya sudah pecah.
2. Tidak utuh :	
a. Terpotong-potong	Spesifikasi mutu sesuai vanili utuh, penuh berisi, warna coklat sampai coklat gelap dan beraroma khas yang tajam. Kadar air maksimum 30%.
b. Bulk	Polong utuh atau terpotong, beraroma khas yang tajam warnanya coklat sampai coklat gelap dan beberapa boleh mempunyai noda besar. Kadar air maksimum 30%.

Sumber: <http://www.disbun.jabarprov.go.id/data/arsip/Panili.pdf>.

2.2. Sistem Pengeringan

Ada dua macam sistem pengeringan, yaitu:

- Sistem Pengeringan Diskontinu

Sistem ini mempunyai tingkat kerumitan yang berbeda-beda, mulai dari yang paling sederhana sampai yang paling rumit. Sistem ini biasanya untuk kapasitas kecil dan menengah. Keuntungan dari sistem ini yaitu pada biaya investasi dan biaya operasionalnya yang relatif murah.

Adapun pada beberapa sistem pengeringan kontinu, dijadikan sebagai ruang penyimpannya juga misalnya pada tipe *tray dryers*. Biasanya pada proses ini merupakan proses pengeringan jangka panjang.

- Sistem Pengeringan Kontinu

Pada sistem ini, benda yang dikeringkan bergerak dan bersinggungan dengan aliran udara yang bergerak pula. Proses pengeringan sistem kontinu didasarkan pada arah gerakan benda yang dikeringkan dan udara di dalam pengering. Ada dua macam yaitu *crossflow dryer* dan *concurrentflow dryer*. Pada *crossflow dryer*, aliran udara melintang terhadap gerakan benda. Sedangkan pada *concurrentflow dryer*, aliran udara bergerak searah dengan gerakan benda. Kelebihan daripada sistem ini yaitu produk yang telah dikeringkan memiliki kadar air yang lebih seragam.

2.3. Alat Pengeringan

Pengeringan mekanis memiliki jenis yang bermacam-macam, beberapa jenis pengering tersebut yaitu:

- *Tray Dryers*

Pengering dengan sistem ini, mewakili beberapa sistem yang memakai aplikasi dari konveksi paksa. Dalam hal ini bahan yang dikeringkan dimasukkan dalam sebuah oven pengering dan diletakkan pada sebuah *tray* yang sudah disusun secara teratur. Udara panas dialirkan dari sumber panas secara paksa oleh fan ke dalam oven pengering sehingga udara panas tersebut akan mengalir di antara *tray* tersebut dan akan mengeringkan bahan yang diletakkan di atas *tray*. Setelah bahan tersebut kering maka oven pengering akan dibuka dan bahan tersebut akan dikeluarkan dari oven pengering.

Bersamaan dengan itu suhu di dalam oven pengering akan menurun, sehingga proses pengeringan berikutnya harus dimulai kembali dari awal dan harus dipanaskan kembali.

- *Batch Dryers*

Jenis ini hampir sama dengan pengering tray dryer tetapi semua bahan yang akan dikeringkan diletakkan pada satu tempat saja yaitu batch tersebut. Proses pengeringan serupa dengan jenis tray dryer tetapi memiliki kemungkinan terjadi kadar kekeringan yang kurang merata lebih tinggi. Jenis ini biasanya digunakan untuk pengeringan biji-bijian.

- *Continuous Dryers*

Tidak seperti pada *tray dryers* dimana oven harus dipanaskan kembali dan diinginkan kembali secara berulang kali. Pada alat pengering kontinu bahan yang akan dikeringkan dapat diletakkan pada suatu sistem pemakanan yang berjalan seperti konveyor. Suplai panas dapat berasal dari *burner* secara langsung maupun dari *heat exchanger* secara tidak langsung.

- *Rotary Dryers*

Alat pengering ini terdiri dari sebuah tabung silindris yang berada dalam posisi horisontal dimana tabung silindris tersebut berotasi pada aksisnya. Pada umumnya posisi horisontal dari tabung tidak sepenuhnya horisontal, namun terdapat sedikit sudut antara tabung tersebut dengan aksisnya. Udara panas yang mengalir di dalam silinder berlaku sebagai medium pengering. Bahan yang akan dikeringkan dimasukkan dari ujung tabung yang mempunyai posisi lebih tinggi, lalu udara panas akan dialirkan ke dalam tabung yang mempunyai posisi lebih tinggi, lalu udara panas akan dialirkan ke dalam tabung, pada saat yang bersamaan dengan berhembusnya udara panas tersebut maka tabung tersebut juga bergerak secara rotari hingga bahan yang dimasukkan ke dalam alat pengering ini mengering, maka bahan tersebut akan keluar secara gravitasi melalui ujung tabung yang posisinya paling rendah. Alat pengering ini pada umumnya digunakan untuk bahan yang berbentuk granular atau kristal.

- *Spray Dryers*

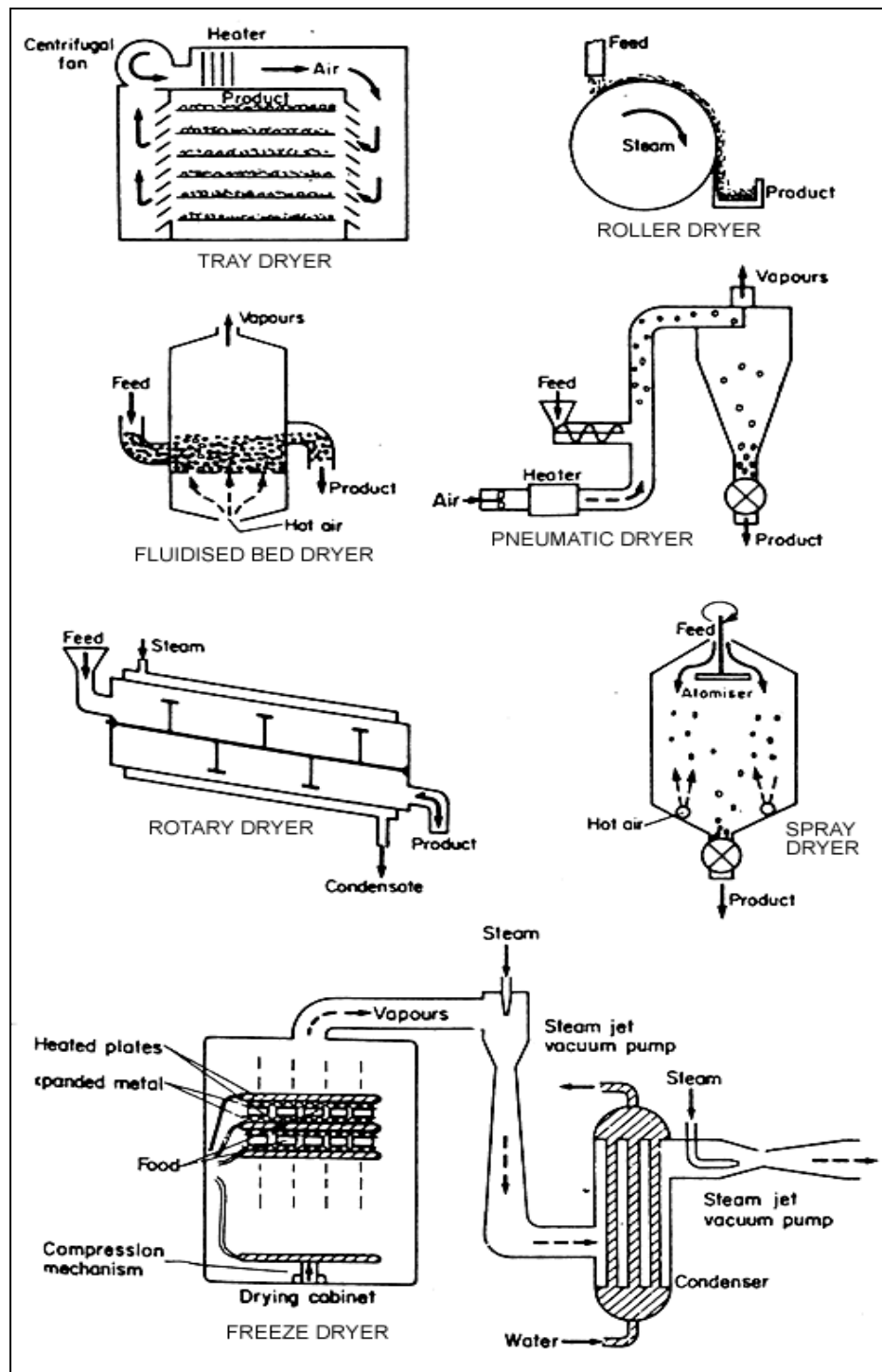
Pada jenis ini, bahan yang dikeringkan biasanya berupa cairan kental, bahan tersebut akan disemprotkan ke dalam ruang pengering melalui nosel dimana alat pengering ini pada umumnya berbentuk silinder, dimana di dalam ruang tersebut juga disemprotkan udara panas sebagai medium pengering sehingga cairan kental tadi akan mengering akibat adanya aliran udara panas yang bertekanan di dalam ruang pengering.

- *Flash and Pneumatic Dryers*

Alat pengering ini biasanya digunakan untuk mengeringkan bahan yang berukuran sangat kecil. Alat ini terdiri dari sebuah saluran pengering yang berukuran panjang dan mempunyai posisi vertikal, dimana bahan yang akan dikeringkan tadi dimasukkan melalui *feeder* yang mempunyai posisi horisontal, lalu bahan yang tadinya mengalir dengan arah aliran horisontal, mengalir ke dalam saluran pengering vertikal tadi, udara panas telah dialirkan ke dalam saluran pengering tersebut sehingga udara panas tersebut akan berfungsi sebagai konveyor bagi partikel tersebut dan akan mendorong partikel tersebut ke atas menuju ke dalam *cyclone*.

- *Fluid Bed Dryers*

Alat pengering ini diperuntukkan bagi batasan yang lebar untuk partikel bahan padat yang berukuran antara 10 μm sampai beberapa sentimeter. Tidak ada bagian dari mesin yang bergerak secara mekanik, dan ruang yang diperlukan untuk alat pengering ini relatif kecil. Partikel yang dikeringkan dalam alat ini harus berupa partikel yang mempunyai bentuk yang regular dan berukuran seragam. Partikel yang akan dikeringkan juga tidak diperbolehkan merupakan partikel yang lengket, karena akan menyebabkan jumlah fluida dalam ruang pengering akan berkurang.



Gambar 2.3. Berbagai tipe alat pengering

Sumber: <http://www.nzifst.org.nz/unitoperations/drying7.htm#roller>

2.4. Kadar Air

Kadar air suatu bahan dapat dinyatakan dengan 2 metode, yaitu:

- Persentase kadar air basis basah

$$M_w = \frac{M_a}{(M_a + M_p)} \times 100\% \quad (2.1)$$

dimana : M_w = persentase kadar air basis basah (%)

M_a = massa H₂O (kg)

M_p = massa padatan (kg)

- Persentase kadar air basis kering

$$M_d = \frac{M_a}{M_p} \quad (2.2)$$

Dimana : M_d = persentase kadar air basis kering (%)

2.5. Psikometri

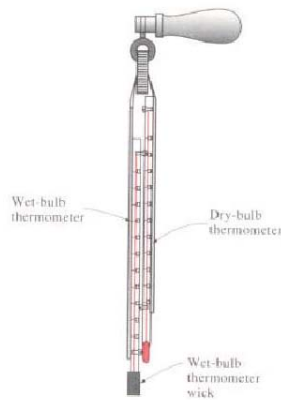
Psikometri merupakan studi atau kajian tentang sifat-sifat campuran udara karena udara atmosfer tidak benar-benar kering, namun merupakan campuran antara udara dan air. Dengan menggunakan kurva psikometrik dapat diketahui sifat-sifat termal udara basah, suhu bola kering, tekanan parsial uap air, kelembaban udara, volume spesifik udara, entalpi dan sebagainya.

- *Dry Bulb Temperature* (T_d)

Merupakan temperatur udara yang diukur dengan termometer biasa.

- *Wet Bulb Temperature* (T_w)

Merupakan udara yang diukur oleh termometer biasa yang *bulb*-nya ditutupi oleh kain basah. Nilai dari T_w selalu lebih rendah dari T_d dikarenakan adanya pendinginan akibat adanya penguapan air dari kain basah. Harga temperatur *bulb* ini akan konstan jika laju penyerapan panas laten selama penguapan air dari permukaan *wet bulb*. Nilai dari T_d dan T_w akan sama jika udara dalam kondisi jenuh uap air sehingga tidak ada uap air yang menguap dari permukaan tanah.



Gambar 2.4. Penggunaan Termometer dalam mengukur *Dry bulb* dan *Welt bulb*
 Sumber: Cengel (1998, p.731)

- *Humidity Ratio* (ω) dan *Relative Humidity* (RH)

Humidity ratio atau kelembaban merupakan jumlah massa uap air dalam 1 kg udara atau merupakan perbandingan antara massa uap air (m_v) dengan massa udara (m_u) yang dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$\omega = \frac{m_v}{m_u} = 0,622 \cdot \frac{P_v}{P_b - P_v} \quad (2.3)$$

dimana $P_b = P_u + P_v$ (kpa)

P_b = tekanan udara (kpa)

P_v = tekanan parsial uap air (kpa)

ω = humidity ratio (kg uap air/kg udara kering)

m_v = massa uap air (kg)

m_a = massa udara kering

Sedangkan *Relative Humidity* (RH / ϕ) merupakan perbandingan tekanan parsial uap air dalam udara (P_v) dengan tekanan uap jenuh (P_{sat}) pada temperatur yang sama dan dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$RH = \phi = \frac{P_v}{P_{sat}} \quad (2.4)$$

dimana P_v = tekanan parsial uap air (kpa)

P_{sat} = tekanan uap jenuh (kpa)

- Tekanan Parsial Uap Air

Tekanan parsial uap air pada sistem pengeringan dapat dicari dengan persamaan :

$$P_v = P_w - \frac{(P_b - P_w) \cdot (T_{DB} - T_{WB})}{1544 - (1,44 \cdot T_{WB})} \quad (2.5)$$

dimana P_w = tekanan saturasi pada T_{WB} (kpa)

P_b = tekanan udara (kpa)

P_v = tekanan parsial uap air (kpa)

T_{DB} = temperatur pada *dry bulb* (°C)

T_{WB} = temperatur pada *wet bulb* (°C)

- *Vapour Density*

Massa jenis dari uap air dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\rho_v = \frac{\omega \cdot \rho_a}{R_a \cdot T_{DB}} = \frac{\omega \cdot (P_b - P_v)}{R_a \cdot T_{DB}} \quad (2.6)$$

dimana ρ_v = massa jenis uap air

ρ_a = massa jenis udara

ω = *humidity ratio* (kg uap air / kg udara kering)

T_{DB} = temperatur pada *dry bulb* (°C)

T_{WB} = temperatur pada *wet bulb* (°C)

- *Dew Point Temperatur*

Salah satu aspek yang perlu diperhatikan mengenai kelembaban udara adalah parsial kondensasi uap air dapat terjadi pada saat temperatur diturunkan. Temperatur dimana mulai terjadi kondensasi uap air ini disebut dengan *Dew Point Temperature*.

2.6. Perpindahan Panas

Perpindahan energi dari suatu sistem ke lingkungannya dapat berupa perpindahan panas dan perpindahan kerja. Perpindahan panas ini sendiri dapat didefinisikan sebagai suatu perpindahan energi yang juga mengikutsertakan

perpindahan *entropy*. Selain itu dapat juga didefinisikan sebagai interaksi energi dimana akibat dari interaksi tersebut di dalam sistem dan lingkungan tidak dapat dihasilkan kembali. Perpindahan panas dapat juga diartikan sebagai interaksi energi yang dikendalikan oleh perbedaan temperatur antara sistem dengan lingkungannya.

Berdasarkan metode dan mekanisme perpindahan panas dari suatu sistem dan lingkungannya, perpindahan panas dapat diklasifikasikan menjadi perpindahan panas konduksi, konveksi dan radiasi.

2.6.1. Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah pemindahan panas dari bagian yang bersuhu tinggi ke bagian yang bersuhu rendah dalam suatu benda dimana terdapat gradien suhu. Perpindahan panas konduksi melibatkan perpindahan kinetik dari molekul yang satu ke molekul yang lain di dekatnya. Di dalam sebuah proses mengalirnya fluida dalam gerakan arus pada proses perpindahan panas konduksi, panas dipindahkan dengan cara konduksi dengan arah perpindahan yang tepat.

2.6.1.1. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding Datar

Sistem ini merupakan sistem perpindahan panas (*heat flow*) satu dimensi dalam arah x per satuan luas. Dengan asumsi bahwa tidak ada sumber panas di dalam sistem, persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (2.7)$$

dimana

k = konduktivitas panas bahan (W/m.K)

L = tebal dinding (m)

A = luasan dinding (m²)

T_1 = suhu pada permukaan panas (K)

T_2 = suhu pada permukaan dingin (K)

Sedangkan untuk resistensi termal, persamaannya dinyatakan sebagai berikut :

$$R_{\text{kond}} = \frac{T_1 - T_2}{q_x} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (2.8)$$

$$R_{\text{konv}} = \frac{T_s - T_\infty}{q_x} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (2.9)$$

$$R_{\text{rad}} = \frac{T_s - T_{\text{surr}}}{q_x} = \frac{1}{h_r \cdot A} \quad (2.10)$$

$$q_x = U \cdot A \cdot \Delta T = U \cdot A \cdot (T_{\infty 1} - T_{\infty 2}) \quad (2.11)$$

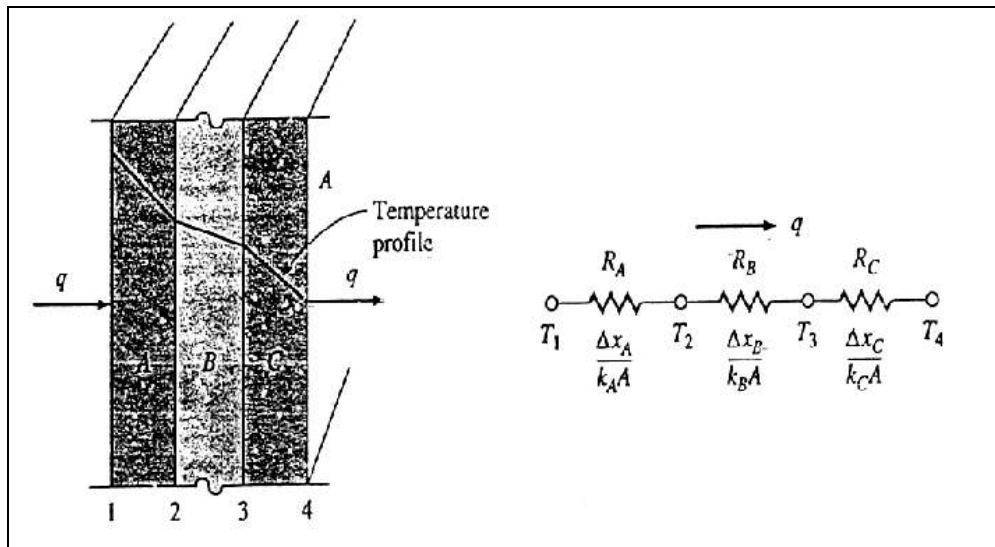
$$U \cdot A = \frac{1}{R_{\text{tot}}} \quad (2.12)$$

dimana h = konduktivitas panas konveksi (W)

h_r = konduktivitas panas radiasi

q_x = laju perpindahan panas (W)

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)



Gambar 2.5. Konduksi pada Dinding Datar

Sumber: Holpman (2002, p. 26)

2.6.1.2. Perpindahan Panas Konduksi Silinder

Dengan asumsi bahwa gradien suhu hanya pada arah radial saja, maka aliran hanya terjadi ke satu dimensi, yaitu arah radial.

Untuk dinding silindris tunggal, persamaan yang digunakan untuk mencari perpindahan panas adalah :

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot (T_2 - T_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.13)$$

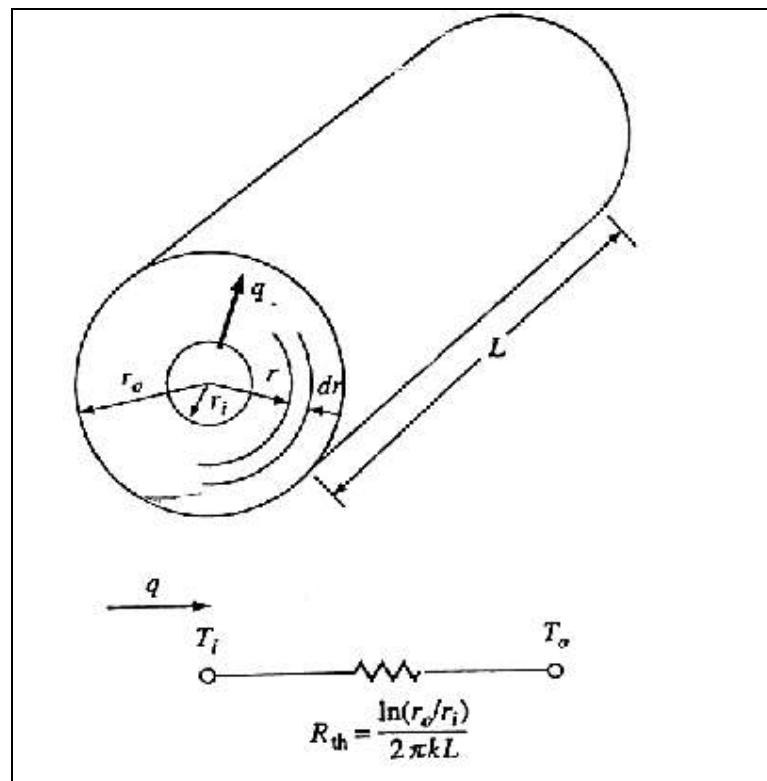
dimana Q = laju perpindahan panas (W)

k = konduktivitas bahan (W/m.K)

T = temperatur (K)

L = panjang silinder (m)

r = jari-jari silinder (m)



Gambar 2.6. Konduksi Silinder Tunggal

Sumber: Holpman (2002, p. 28)

Sedangkan untuk silindris yang dindingnya berlapis, maka laju perpindahan panasnya adalah

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L \cdot (T_1 - T_0)}{\ln(r_o / r_i)} \quad (2.14)$$

$$\text{Resistensi Thermis (R}_{th}) = \frac{\ln \frac{r_o}{r_i}}{2 \cdot \pi \cdot K \cdot L} \quad (2.15)$$

$$\text{Sehingga : } Q = \frac{2\pi L (T_1 - T_4)}{\ln(r_2 / r_1) / k_A + \ln(r_3 / r_2) / k_B + \ln(r_4 / r_3) / k_C} \quad (2.16)$$

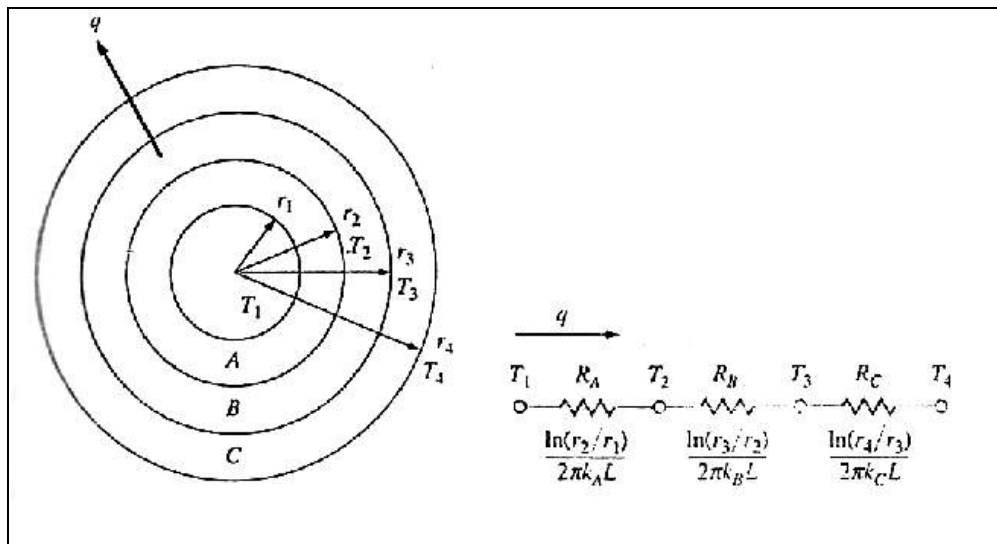
dimana Q = laju perpindahan panas (W)

k = konduktivitas bahan (W/m.K)

T = temperatur (K)

L = panjang silinder (m)

r = jari-jari silinder (m)



Gambar 2.7. Konduksi Silinder Berlapis

Sumber: Holpman (2002, p. 29)

2.6.2. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi antara permukaan benda dengan fluida yang bergerak ketika keduanya berada pada

perbedaan temperatur. Hal ini berarti adanya perpindahan massa, dan adanya gradien suhu yang menyebabkan fluida bergerak akibat dari adanya pembesaran rapat massa.

Perpindahan panas konveksi terbagi menjadi 2 cara :

- Perpindahan panas konveksi paksa, yaitu bila aliran disebabkan oleh beberapa cara yang berasal dari luar, misalnya fan pompa atau tiupan angin.
- Perpindahan panas konveksi bebas atau konveksi alam terjadi karena fluida yang akibat dari pemanasan berubah kerapatannya dan bergerak naik.

Tanpa memperhatikan cara perpindahan panas konveksi, maka laju perpindahan panas dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (2.17)$$

dimana :

q = laju perpindahan kalor (W)

h = koefisien perpindahan kalor ($W/m^2.K$)

A = luas permukaan (m^2)

T_s = temperatur permukaan (K)

T_∞ = temperatur fluida (K)

Secara umum aliran fluida dikategorikan menjadi dua macam, yaitu aliran laminar dan aliran turbulen, baik pada aliran luar maupun aliran dalam. Aliran laminar adalah aliran fluida yang teratur, sehingga garis arus yang dilalui partikel sangat jelas dan mudah ditemukan. Sedangkan aliran turbulen adalah gerakan fluida yang tidak teratur yang disebabkan adanya fluktuasi kecepatan, sehingga akan memperbesar gesekan dan laju konveksi. Jenis aliran biasanya ditentukan oleh besarnya Reynolds Number.

2.6.2.1. Aliran Luar

Pada aliran luar, konduktivitas panas konveksi dipengaruhi oleh Nusselt Numbers (Nu) sedangkan Nusselt Numbers itu sendiri dipengaruhi oleh Reynolds Numbers (Re) dan Prandtl Numbers (Pr).

2.6.2.1.1. Aliran pada Tube

Bilangan Reynolds pada aliran dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$Re_{\rho} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu \cdot n} = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\pi \cdot D \cdot \mu \cdot n} \quad (2.18)$$

Bilangan Nusselt pada aliran dapat dicari dengan menggunakan persamaan

$$Nu_D = C(Re_D)^m \cdot Pr^{1/3} = \frac{h \cdot D}{k} \quad (2.19)$$

dimana :

untuk aliran laminar $Re < 2300$, turbulen $Re > 2300$

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

μ = viskositas dinamik ($kg/m \cdot s$)

V = kecepatan aliran fluida (m/s)

D = diameter tube (m)

k = konduktivitas bahan ($W/m \cdot K$)

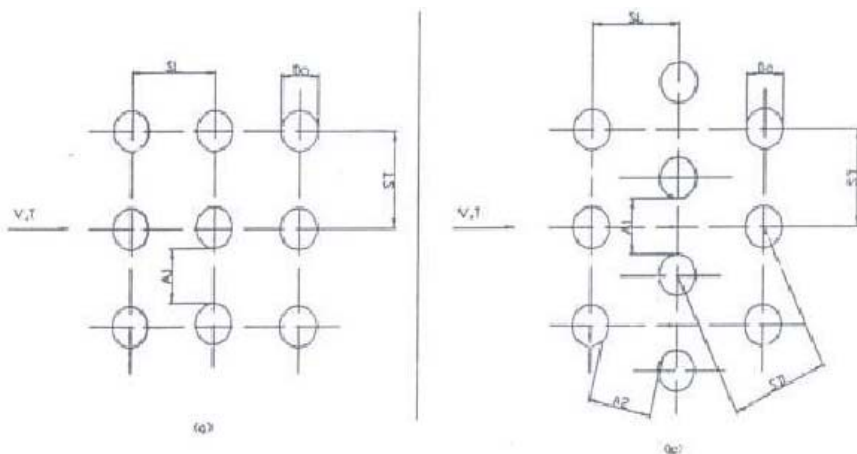
n = jumlah tube

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

Pr = bilangan Prandtl

Re = bilangan Reynolds

Tube memiliki dua macam susunan, yaitu *aligned* dan *staggered*.



Gambar 2.8. Susunan Tube a. *aligned* b. *staggered*

Sumber: Holpman (1997, p. 291)

Pada susunan *aligned*, V_{\max} muncul pada daerah A_1 sehingga persamaannya adalah sebagai berikut :

$$V_{\text{MAX}} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (2.20)$$

dimana : V_{\max} = kecepatan maksimum

V = kecepatan udara masuk ke pipa

S_T = jarak vertikal antara pusat pipa

D = diameter

Pada susunan *staggered*, V_{\max} dapat terjadi pada A_1 dan A_2 , bila V_{\max} terjadi pada A_2 maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} < \frac{S_T + D}{2} \quad (2.21)$$

dan terjadi pada A_1 bila :

$$S_D = \sqrt{S_L^2 + \left(\frac{S_T}{2}\right)^2} > \frac{S_T + D}{2} \quad (2.22)$$

$$V_{\text{MAX}} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} \cdot V \quad (2.23)$$

dimana :

S_D = jarak diagonal antara pusat pipa

S_L = jarak horizontal antara pusat pipa

D = diameter

2.6.2.1.2. Aliran Luar pada Plat Datar

Persamaan Nusslet Numbers yaitu :

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{k} = C \cdot \text{Re}_L^m \cdot \text{Pr}^n \quad (2.24)$$

dimana : L = panjang plat dalam aliran

(C, m, n konstan)

Temperatur fluida pada *thermal boundary layer* berubah dari T_s hingga sekitar T_∞ pada bagian terluar dari *boundary*. Sehingga properties fluida menggunakan temperatur film, dengan persamaan :

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.25)$$

Sedangkan persamaan Reynolds Numbers, yaitu :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot x}{\mu}$$

dimana : ρ = massa jenis dari fluida (kg/m^3)

v = kecepatan rata-rata dari fluida (m/s)

x = panjang dari geometri (m)

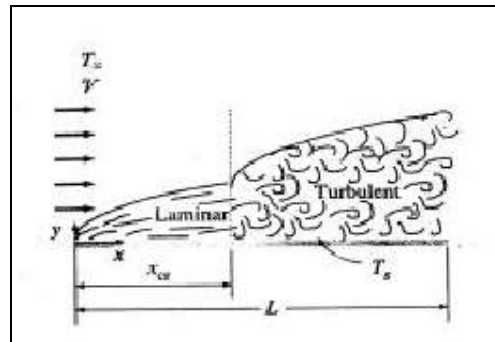
μ = viskositas dinamik dari fluida (N.s/m^2)

Bilangan Prandtl dihitung dengan menggunakan rumus :

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.26)$$

dimana : ν = viskositas kinematik (m^2/s)

α = difusivitas



Gambar 2.9. Aliran pada Plat Datar

Sumber: Cengel (2004, p. 371)

- Aliran Laminer

Persamaan yang berlaku pada aliran laminar yaitu :

$$C_{f,ave} = \frac{1,328}{Re_x^{1/2}} \quad (Re_x < 5 \cdot 10^5) \quad (2.27)$$

$$Nu = 0,664 \cdot Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/2} \quad (Pr > 0,6) \quad (2.28)$$

dimana C_f = *friction coefisien*

Panjang plat agar aliran dapat disebut aliran laminar harus memenuhi syarat maka $x \leq x_{cr}$ (nilai Re kritis = $5 \cdot 10^5$)

- Aliran Turbulen

Persamaan yang berlaku pada aliran turbulen yaitu :

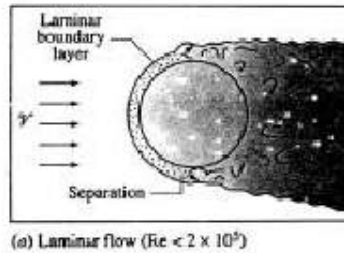
$$C_{f,ave} = \frac{0,0592}{Re_x^{1/2}} \quad (5 \cdot 10^5 \leq Re_x \leq 10^7) \quad (2.29)$$

$$Nu = 0,0292 \cdot Re_x^{4/5} \quad (0,6 \leq Pr \leq 60 ; 5 \cdot 10^5 \leq Re_x \leq 10^7) \quad (2.30)$$

2.6.1.1.3. Untuk Aliran Luar pada Silinder

Nilai bilangan Reynolds kritis pada silinder yaitu $Re_{cr} \approx 2 \cdot 10^5$.

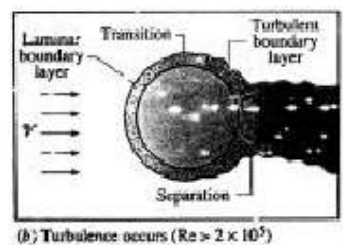
- Aliran Laminer



Gambar 2.10. Aliran Laminer
Sumber: Cengel (2004, p. 382.)

Nilai bilangan Reynolds $< 2 \cdot 10^5$

- Aliran Turbulen



Gambar 2.11. Aliran Turbulen
Sumber: Cengel (2004, p. 382.)

Nilai bilangan Reynolds $> 2 \cdot 10^5$

$$Nu_D = 1,13 \cdot C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{1/3}, \text{ untuk } Pr \geq 0,7 \quad (2.31)$$

2.6.2.2. Aliran Dalam

Aliran dalam juga dikategorikan dalam dua macam yaitu aliran laminar dan turbulen. Untuk menentukan aliran tersebut diperlukan Reynolds Number.

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.32)$$

Apabila aliran melalui *noncircular tube* maka persamaannya :

$$Re = \frac{\rho \cdot v D_h}{\mu} \quad (2.33)$$

$$D_h = \frac{4 \cdot A_c}{P} \quad (2.34)$$

dimana : D_h = diameter hidrolis
 A_c = luasan yang dilalui
 P = keliling luasan

Batasan untuk menentukan jenis aliran :

Laminar, $Re < 2300$

Kritis, $2300 \leq Re \leq 10000$

Turbulen, $Re > 10000$

- Aliran Laminar

Persamaan Nusselt untuk aliran yang *fully developed*:

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 4,36, \text{ untuk } q \text{ konstan} \quad (2.35)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 3,36, \text{ untuk } T_s \text{ konstan} \quad (2.36)$$

- Aliran Turbulen

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \left(\begin{array}{l} 0,7 \leq Pr \leq 160 \\ Re > 10000 \\ L/D \geq 10 \end{array} \right) \quad (2.37)$$

dimana : $n = 0,4$ untuk proses pemanasan
 $n = 0,3$ untuk proses pendinginan
($0,7 < Pr < 170$)

2.6.3. Perpindahan Panas Radiasi

Radiasi adalah energi yang dipancarkan oleh benda yang berada pada temperatur tinggi. Energi dari medan radiasi ini dipindahkan secara gelombang elektromagnetik yang berasal dari energi dalam dari material yang memancar.

Panas yang dipancarkan dari permukaan dapat dinyatakan dengan hukum Stefan-Boltzman dimana persamaannya adalah sebagai berikut :

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.38)$$

dimana :

q = panas yang dipancarkan (W)

ε = emisivitas dari permukaan benda

σ = konstanta Stefan-Boltzman $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m²K)

A = luas permukaan (m²)

T_s = temperatur permukaan (K)

T_∞ = temperatur lingkungan (K)

2.7. Perpindahan Massa

Perpindahan massa dapat terjadi karena beberapa macam fenomena yang berlainan. Salah satu yang termasuk dalam perpindahan massa yaitu perpindahan massa secara konveksi, perpindahan massa secara konveksi merupakan perpindahan massa antara suatu permukaan dengan fluida bergerak yang berkaitan dengan difusi massa dan pergerakan fluida. Persamaan-persamaan pada perpindahan massa secara konveksi dapat dianalogikan dengan perpindahan panas konveksi dengan batasan-batasan tertentu.

Difusi massa antara H₂O dengan udara dapat ditentukan dengan persamaan :

$$D_{AB} = 1,87 \cdot 10^{-10} \times \frac{T^{2,072}}{P}, \quad 280 \text{ K} < T < 450 \text{ K} \quad (2.39)$$

Dengan menggunakan analogi terhadap perpindahan panas konveksi, *Schmidt number* yang menunjukkan hubungan antara *molecular momentum* dengan difusi massa dianalogikan dengan *Prandtl number*.

Schmidt number ditentukan dengan persamaan:

$$Sc = \frac{v}{D_{AB}} \quad (2.40)$$

dimana : v momentum diffusivity (m^2/s)

Sedangkan untuk *Sherwood number* yang menunjukkan efektifitas dari perpindahan massa konveksi dapat dianalogikan dengan Nusselt number.

Sherwood number ditentukan dengan persamaan :

$$Sh = h_m \cdot \frac{D_h}{D_{AB}} \quad (2.41)$$

$$Sh = 0,664Re^{1/2}Pr^{1/3}, \text{ untuk } Sc > 0,5 \quad (2.41)$$

dimana : h_m = koefisien perpindahan massa (m/s)

D_h = diameter hidrolik

Untuk laju perpindahan massa ditentukan dengan persamaan :

$$\dot{m}_v = h_m \cdot A \cdot (\rho_{v,s} - \rho_{v,\infty}) \quad (2.42)$$

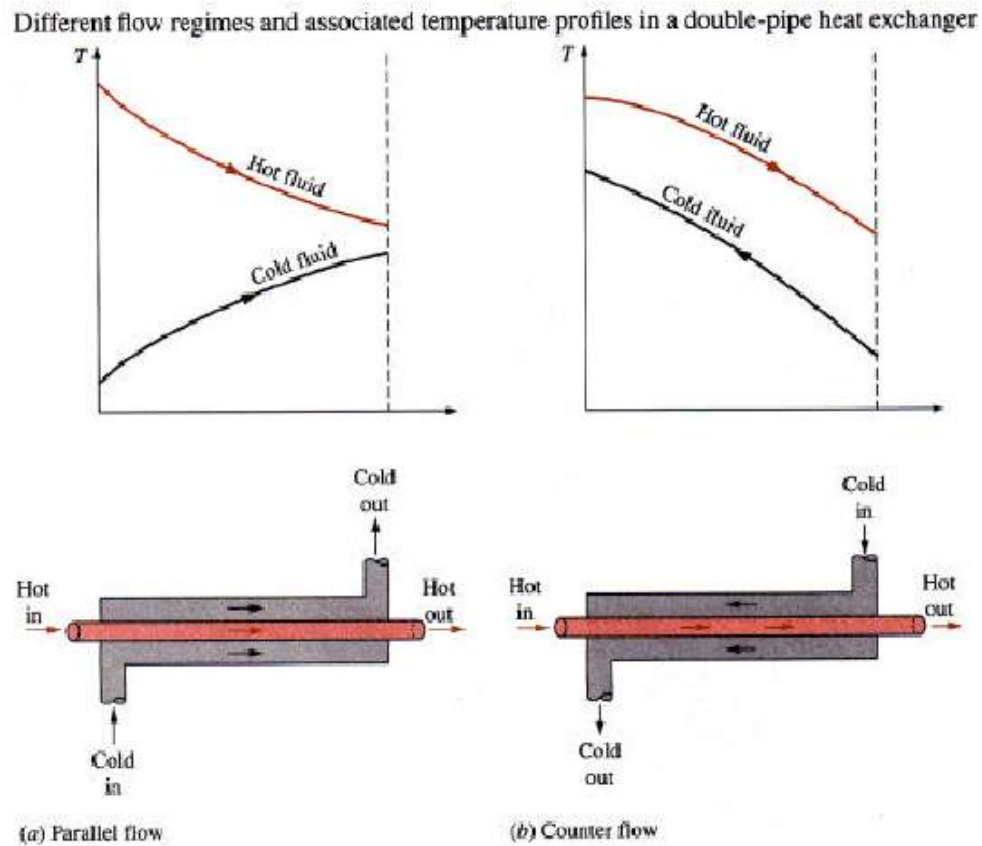
dimana : A = permukaan benda (m^2)

2.8. Penukar Kalor

Penukar kalor adalah piranti untuk melaksanakan perpindahan energi *thermal* dari satu fluida ke fluida yang lain, antara permukaan benda padat dengan fluida, antara partikel benda padat dengan fluida pada temperatur yang berbeda dan dalam kontak *thermal*. Dalam penukar kalor, pada umumnya tidak terdapat panas eksternal dan interaksi kerja. Pada pemakaian atau aplikasi penukar kalor yang paling sederhana fluida panas dan dingin bercampur langsung. Dalam kebanyakan penukar kalor fluida itu terpisah oleh dinding. Penukar kalor jenis ini disebut *recuperator*, dinding tersebut mungkin hanya berupa dinding datar sederhana yang memisahkan dua fluida yang mengalir. Tetapi mungkin juga merupakan konfigurasi rumit yang melibatkan lintas-lintas rangkap, sirip susunan konsentrik atau sekat. Pada umumnya dinding pemisah yang digunakan dalam alat penukar kalor adalah susunan tabung konsentrik dan plat datar. Dalam hal ini diperlukan prinsip-prinsip perpindahan kalor konduksi dan konveksi, kadang-kadang juga radiasi untuk memberikan proses pertukaran energi.

2.8.1. Jenis-jenis Penukar Kalor

Ada beberapa perbedaan ragam alat penukar panas yang dapat diklasifikasikan menurut aliran fluida. Bentuk yang sederhana adalah alat penukar panas dimana fluida dingin dan fluida panas mengalir dalam arah yang sama atau berlawanan, dimana kedua fluida dapat dipisahkan oleh dinding datar, tetapi pada umumnya dipisahkan oleh susunan tabung konsentrik.



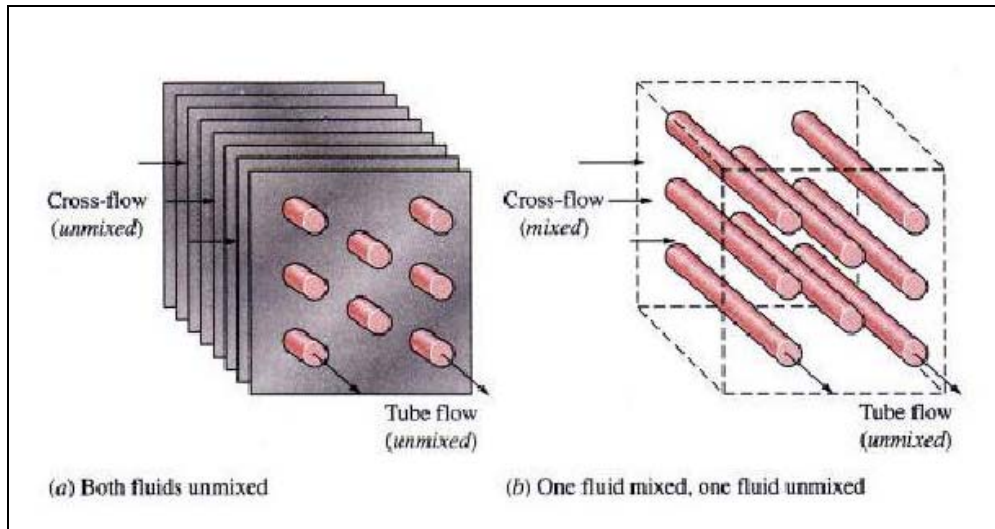
Gambar 2.12. Alat Penukar Panas Tabung Konsentrik

a. *Parallel flow* b. *Counter flow*

Sumber: Cengel (1998, p. 570)

Pada susunan aliran searah, fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang sama mengalir pada arah yang sama dan keluar pada ujung yang sama pula. Sedangkan pada susunan aliran berlawanan fluida masuk pada ujung yang berlawanan, mengalir secara berlawanan dan berakhir pada yang berlawanan pula.

Bentuk yang lain adalah bentuk alternatif, dimana pada alat penukar panas ini fluida dalam arah melintang (*cross flow*) atau dengan kata lain fluida bergerak dengan sudut tegak lurus dengan yang lain. Pada alat penukar panas tipe ini dapat dikatakan *unmixed* karena fluida tersebut tidak dapat bergerak bebas dalam arah normal terhadap aliran fluida tersebut tidak dapat bergerak bebas dalam arah normal terhadap aliran fluida tersebut. Penukar panas tipe *cross flow* dikatakan *mixed* karena gas dapat bergerak bebas dalam arah normal terhadap arah aliran fluida tersebut.



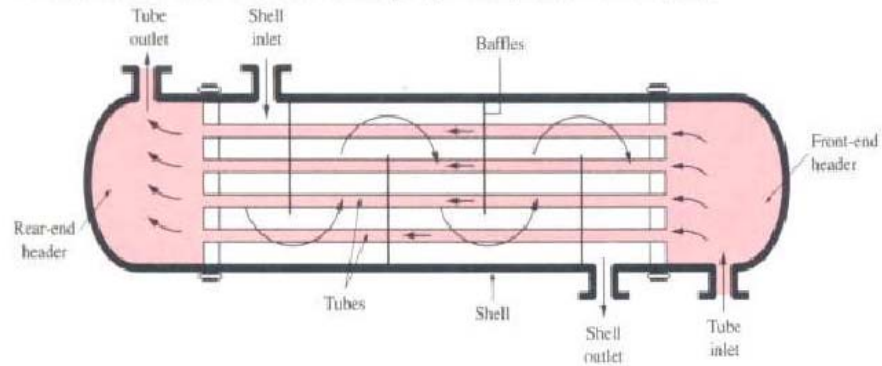
Gambar 2.13. Alat Penukar Panas Cross Flow

a. *unmixed* b. *mixed*

Sumber: Cengel (1998. p. 572)

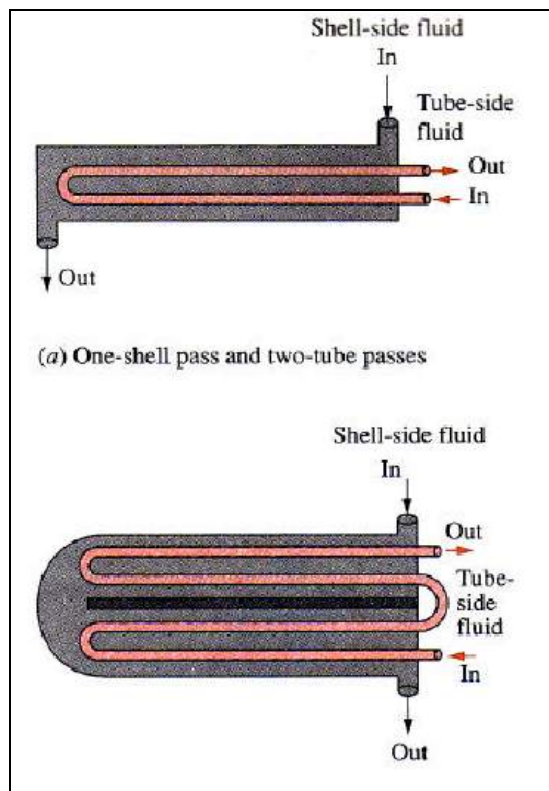
Kondisi aliran menjadi kompleks untuk alat penukar panas jenis *shell and tube*. Jenis ini memiliki beberapa bentuk spesifikasi tergantung pada jumlah pipa atau jumlah *shell* yang dilaluinya.

The schematic of a shell-and-tube heat exchanger (one-shell pass and one-tube pass).



Gambar 2.14. Alat penukar panas *shell* dan *tube* dengan jumlah *shell* dan *tube* masing-masing satu buah

Sumber: Cengel (1998. p. 572)



Gambar 2.15. Jenis-jenis alat penukar panas *shell and tube*.

a. satu *shell* dan dua *tube* b. dua *shell* dan empat *tube*

Sumber: Cengel (1998. p. 585)

2.8.2. Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan

Jika aliran fluida dipisahkan oleh dinding pipa dimana salah satu fluida mengalir di dalam tabung kecil, sedang fluida yang satu mengalir melintasi tabung, maka koefisien perpindahan panas keseluruhan (U) dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} \quad (2.44)$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}^o}{A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi \cdot k L} + \frac{R_{f,o}^o}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2.45)$$

dimana :

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan ($W/m^2.K$)

R_f^o = *Fouling factor* ($m^2.K/W$)

A = luas permukaan (m^2)

h = koefisien perpindahan kalor ($W/m^2.K$)

k = konduktivitas panas bahan ($W/m.K$)

L = panjang pipa (m)

2.8.3. Faktor Pengotoran

Setelah dipakai beberapa lama, pada permukaan penukar kalor mungkin dilapisi oleh berbagai endapan yang biasa terdapat dalam sistem aliran, atau permukaan itu mungkin mengalami korosi sebagai akibat interaksi antara fluida dengan bahan yang digunakan dalam penukar kalor. Lapisan endapan tersebut akan memberikan tahanan tambahan terhadap aliran kalor, dan ini dapat menyebabkan turunnya kemampuan kerja alat penukar kalor. Pengaruh menyeluruh dari hal tersebut dapat dinyatakan dengan faktor pengotoran.

$$R_f = \frac{1}{U_{kotor}} - \frac{1}{U_{bersih}} \quad (2.46)$$

2.8.4. Analisa Penukar Kalor dengan metode LMTD

Temperatur fluida di dalam penukar kalor pada umumnya tidak konstan tetapi bervariasi sehingga terjadi perbedaan temperatur fluida panas dan fluida dingin ketika masuk dan pada waktu keluar.

Dengan mengabaikan perpindahan panas antara penukar panas dengan lingkungannya sebagaimana pengabaian terhadap perubahan energi potensial dan energi kinetiknya, dan bila q merupakan laju perpindahan panas total antara fluida panas dan dingin, maka penerapan persamaan kesetimbangan energi adalah sebagai berikut :

Untuk fluida panas laju perpindahan panasnya adalah sebagai berikut :

$$q = \dot{m}_h \cdot C_{p,h} \cdot (T_{h,i} - T_{h,o}) = \dot{m}_h (h_{h,i} - h_{h,o}) \quad (2.47)$$

Untuk fluida dingin laju perpindahan panasnya adalah sebagai berikut :

$$q = \dot{m}_c \cdot C_{p,c} \cdot (T_{c,i} - T_{c,o}) = \dot{m}_c (h_{c,i} - h_{c,o}) \quad (2.48)$$

Perbedaan temperatur antara fluida dingin dan panas dapat dicari dengan persamaan :

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (2.49)$$

Persamaan ini dapat dilengkapi dengan koefisien perpindahan panas keseluruhan U yang digunakan sebagai pengganti koefisien konveksi tunggal h . Karena harga T bervariasi terhadap posisi pada alat penukar panas, maka hal ini dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.50)$$

dimana : ΔT_{IM} adalah perbedaan temperatur rata-rata yang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$\Delta T_{IM} = \frac{(T_{h,2} - T_{c,2}) - (T_{h,1} - T_{c,1})}{\ln \left[\frac{T_{h,2} - T_{c,2}}{T_{h,1} - T_{c,1}} \right]} \quad (2.51)$$

dimana : ΔT_{Im} = perbedaan temperatur rata-rata

T_h = temperatur fluida panas (K)

T_c = temperatur fluida dingin (K)

2.8.5. Analisa Penukar Kalor dengan Metode *Effectiveness* – NTU

Bila hanya temperatur fluida masuk saja yang diketahui, maka lebih tepat bila digunakan pendekatan dengan Metode *Effectiveness* – NTU. Metode ini berhubungan dengan laju perpindahan panas maksimum.

Jika $C_c < C_h$

Maka persamaan yang digunakan untuk mencari perpindahan panas maksimum adalah $q_{\max} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i})$ (2.52)

Jika $C_h < C_c$

Maka persamaan yang digunakan untuk mencari perpindahan panas maksimum adalah $q_{\max} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i})$ (2.53)

dimana: q = laju perpindahan panas (kW)

C_h = kapasitas perpindahan panas pada suhu panas (kW/°C)

C_c = kapasitas perpindahan panas pada suhu dingin (kW/°C)

T_h = temperatur pada suhu panas (°C)

T_c = temperatur pada suhu dingin (°C)

Effectiveness (ε) adalah perbandingan antara laju perpindahan panas aktual untuk penukar kalor pada kemungkinan laju perpindahan panas maksimal. Dimana dapat dicari dengan menggunakan persamaan :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}} \quad (2.54)$$

dimana: ε = *effectiveness* perpindahan panas

q = laju perpindahan panas actual (kW)

q_{\max} = laju perpindahan panas maksimum (kW)

sehingga perpindahan panas aktual dapat ditentukan dengan :

$$q = \varepsilon C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (2.55)$$

dimana: C_{\min} = kapasitas perpindahan panas minimum (kW/°C)

T_h = temperatur pada suhu panas (°C)

T_c = temperatur pada suhu dingin (°C)

NTU merupakan parameter yang tidak berdimensi dan digunakan secara luas pada analisis penukar panas dan didefinisikan sebagai berikut :

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad (2.56)$$

dimana: NTU = *number of transfer unit*

U = koefisien perpindahan panas keseluruhan (W/m².K)

C_{min} = kapasitas perpindahan panas minimum (kW/°C)

A = luas permukaan (m²)

2.9. Head Loss

Pada suatu aliran dalam terjadi penurunan tekanan, dan untuk menentukan perbedaan tekanan antara dua titik pada suatu perpipaan diperlukan persamaan dari *total head loss*.

Total head loss dinyatakan dengan persamaan :

$$\left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{\bar{V}_1}{2} + g \cdot z_1 \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{\bar{V}_2}{2} + g \cdot z_2 \right) = h_T \quad (2.57)$$

dimana: P = tekanan (N/m²)

ρ = densitas (kg/m³)

V = kecepatan aliran (m/s)

Total head loss sendiri terdiri dari *major losses* dan *minor losses*, dimana *major losses* berkaitan dengan friksi pada *fully developed flow* pada suatu luasan yang konstan. Sedangkan *minor losses* berkaitan dengan friksi pada luasan saat aliran akan masuk, perubahan luasan, dan sebagainya.

2.9.1. Major Loses

- Aliran Laminar

$$h_t = \left(\frac{64}{Re} \right) \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (2.58)$$

dimana: L = panjang pipa (m)

D = diameter pipa (m)

V = kecepatan aliran (m/s)

- Aliran Turbulen

$$h_t = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2} \quad (2.59)$$

dimana : f = koefisien friksi

2.9.2. *Minor Losses*

$$h_t = K \frac{V^2}{2} \quad (2.60)$$

dimana : $K = \text{minor loss coefficient}$

2.10. **Bahan Bakar**

Bahan bakar adalah material yang dikonsumsi untuk membebaskan energi *thermal*. Bahan bakar diklasifikasikan menurut kondisi fisiknya :

- Bahan bakar padat
- Bahan bakar cair
- Bahan bakar gas

Panas pembakaran dari suatu bahan bakar adalah panas yang dihasilkan dari pembakaran sempurna bahan bakar pada volume konstan kalorimeter. Panas pembakaran dari bahan bakar bisa dinyatakan dalam High Heating Value (HHV) dan dalam Low Heating Value (LHV).

HHV dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{HHV} = 33950C + 144200 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9400S \quad (2.61)$$

dimana :

HHV = High Heating Value (kJ/kg)

C = kandungan karbon

H = kandungan hydrogen

O = kandungan oksigen

S = kandungan sulfur

LHV dapat dicari dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$\text{LHV} = \text{HHV} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{fuel}}} \cdot h_{\text{fg}} \quad (2.62)$$

dimana :

LHV = Low Heating Value (kJ/kg)

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ = berat molekul air (kg air)

M_{fuel} = berat jumlah molekul bahan bakar (kg bahan bakar)

h_{fg} = panas latent dari hasil penguapan air pada (kJ/kg) temperatur
25°C (kJ/kg)

Density bahan bakar dapat dinyatakan *Conventional Specific Gravity* (SG)
atau *API Specific Gravity* (°API)

$$SG = \frac{141,5}{^{\circ}\text{API} + 131,5} \quad (2.63)$$