

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Jenis Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor dari suatu zat ke zat lain seringkali terjadi dalam kehidupan sehari-hari baik penyerapan atau pelepasan kalor, untuk mencapai dan mempertahankan keadaan yang dibutuhkan sewaktu proses berlangsung. Kalor sendiri adalah salah satu bentuk energi.

Hukum kekekalan energi menyatakan bahwa energi tidak musnah, contohnya hukum kekekalan massa dan momentum, ini artinya kalor tidak hilang. Energi hanya berubah bentuk dari bentuk yang pertama ke bentuk yang kedua.

Kalor dapat diangkut dengan tiga macam cara yaitu:

a. Pancaran (Radiasi)

Yang dimaksud dengan pancaran (radiasi) ialah perpindahan kalor melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain. Semua benda memancarkan kalor. Keadaan ini baru terbukti setelah suhu meningkat. Pada hakekatnya proses perpindahan kalor radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnet. Apabila sejumlah energi kalor menimpa suatu permukaan, sebagian akan dipantulkan, sebagian akan diserap ke dalam bahan, dan sebagian akan menembusi bahan dan terus ke luar. Jadi dalam mempelajari perpindahan kalor radiasi akan melibatkan suatu fisik permukaan.

b. Hantaran (konduksi)

Yang dimaksud dengan hantaran ialah pengangkutan kalor melalui satu jenis zat. Sehingga perpindahan kalor secara hantaran/konduksi merupakan satu proses

pendalaman karena proses perpindahan kalor ini hanya terjadi di dalam bahan. Arah aliran energi kalor, adalah dari titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah.

Bahan yang dapat menghantar kalor dengan baik dinamakan konduktor. Penghantar yang buruk disebut isolator. Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan suatu isolator atau konduktor ialah koefisien konduksi termal. Apabila nilai koefisien ini tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat

c. Aliran (konveksi)

Yang dimaksud dengan aliran ialah perpindahan kalor oleh gerak dari zat yang dipanaskan. Proses perpindahan kalor secara aliran/konveksi merupakan satu fenomena permukaan. Proses konveksi hanya terjadi di permukaan bahan. Jadi dalam proses ini struktur bagian dalam bahan kurang penting. Keadaan permukaan dan keadaan sekelilingnya serta kedudukan permukaan itu adalah yang utama. Lazimnya, keadaan keseimbangan termodinamik di dalam bahan akibat proses konduksi, suhu permukaan bahan akan berbeda dari suhu sekelilingnya. Dalam hal ini terdapat keadaan suhu tidak seimbang diantara bahan dengan sekelilingnya.

2.2 Fungsi alat penukar kalor

Dalam praktek, fungsi penukar kalor yang dipergunakan di industri lebih diutamakan untuk menukarkan energi dua fluida (boleh sama zatnya) yang berbeda temperaturnya. Pertukaran energi dapat berlangsung melalui bidang atau permukaan perpindahan panas yang memisahkan kedua fluida atau secara kontak langsung (fluidanya bercampur). Energi yang dipertukarkan akan menyebabkan

perubahan temperatur fluida (panas sensibel) atau kadang dipergunakan untuk berubah fasa (panas laten). Laju perpindahan energi dalam penukar kalor dipengaruhi oleh banyak faktor seperti kecepatan aliran fluida, sifat-sifat fisik yang dimiliki oleh kedua fluida yang saling dipertukarkan energinya (viskositas, konduktivitas termal, kapasitas panas spesifik, dan lain-lain), beda temperatur antara kedua fluida, dan sifat permukaan bidang perpindahan panas yang memisahkan kedua fluida. Bagaimana pengaruh setiap parameter terhadap laju perpindahan panas akan dibahas secara lebih detail dalam modul yang lain. Walaupun fungsi penukar kalor adalah untuk menukarkan energi dua fluida atau dua zat, namun jenisnya banyak sekali. Hal ini terjadi karena biasanya desain penukar kalor harus menunjang fungsi utama proses yang akan terjadi di dalamnya.

2.3 Jenis-jenis alat penukar kalor

Standar yang banyak dipergunakan dalam masalah penukar kalor ini yaitu TEMA (Tubular Exchanger Manufacturer Association) yaitu suatu asosiasi para pembuat penukar kalor di Amerika dan ASME (American Society of Mechanical Engineers). TEMA lebih banyak membahas mengenai jenis penukar kalor, metode perhitungan kinerja dan kekuatannya (proses perancangan), istilah bagian-bagian dari penukar kalor (parts), dan dasar pemilihan dalam aplikasi penukar kalor dalam kehidupan sehari-hari khususnya di industri. Sedangkan ASME lebih memuat masalah prosedur dasar bagaimana membuat penukar kalor serta standard bahan yang akan atau biasa dipergunakan. Kedua aturan atau prosedur tersebut tidak lain bertujuan untuk melindungi para pemakai dari bahaya kerusakan,

kegagalan operasi, serta kemana dan dengan alasan apa apabila terjadi “complaint” terhadap masalah yang terjadi. Hal ini dapat dimengerti karena pada umumnya penukar kalor bekerja pada temperatur dan tekanan yang tinggi serta kadang-kadang menggunakan fluida yang bersifat kurang ramah terhadap kehidupan manusia.

Namun demikian di dalam pembicaraan di kalangan akademisi, klasifikasi penukar kalor ini menjadi lebih luas karena dapat digolong-golongkan berdasarkan berbagai aspek, antara lain:

a. Jenis penukar kalor berdasarkan proses perpindahan panas yang terjadi.

Berdasarkan proses perpindahan panas yang terjadi, penukar kalor dapat dibedakan menjadi dua golongan yaitu :

- Tipe kontak langsung

dimana antara dua zat yang dipertukarkan energinya dicampur atau dikontakkan secara langsung. Contohnya adalah clinker cooler dimana antara clinker yang panas dengan udara pendingin berkontak langsung. Contoh yang lain adalah cooling tower untuk mendinginkan air pendingin kondenser pada instalasi mesin pendingin sentral atau PLTU, dimana antara air hangat yang didinginkan oleh udara sekitar saling berkontak seperti layaknya air mancur. Dengan demikian ciri khas dari penukar kalor seperti ini (kontak langsung) adalah bahwa kedua zat yang dipertukarkan energinya saling berkontak secara langsung (bercampur) dan biasanya kapasitas energy yang dipertukarkan relatif kecil. Contoh-contoh lain adalah desuper-heater tempat mencampur uap panas lanjut dengan air agar temperatur uap turun, pemanas air umpan ketel uap (boiler) dengan

memanfaatkan uap yang diekstraksi dari turbin uap. Alat yang terakhir ini sering disebut feed water heater

- Tipe tidak kontak langsung

maksudnya antara kedua zat yang dipertukarkan energinya dipisahkan oleh permukaan bidang padatan seperti dinding pipa, pelat, dan lain sebagainya sehingga antara kedua zat tidak tercampur. Dengan demikian mekanisme perpindahan panas dimulai dari zat yang lebih tinggi temperaturnya mula-mula mentransfer energinya ke permukaan pemisah untuk kemudian diteruskan ke zat yang berfungsi sebagai pendingin atau penerima energi. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Contoh dari penukar kalor seperti ini sering kita jumpai antara lain radiator mobil, evaporator AC, pendingin oli gearbox dengan air, dan lain-lain. Dengan bahan pemisah yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi diharapkan tahanan termal bahan tersebut akan rendah sehingga seolah-olah antara kedua zat yang saling dipertukarkan energinya seperti kontak langsung. Bedanya dengan yang kontak langsung adalah masalah luas permukaan transfer energi. Pada jenis kontak langsung luas permukaan perpindahan panas sangat tergantung pada luas kontak antara kedua zat, sedangkan pada tipe tidak kontak langsung luas permukaan sama dengan luas permukaan yang memisahkan kedua zat.

- b. Jenis penukar kalor berdasarkan tingkat kekompakan permukaan pemindah panas

Yang dimaksud dengan kekompakan luas permukaan perpindahan panas di sini adalah luas permukaan efektif yang tersentuh oleh salah satu zat (biasanya diambil yang tertinggi nilainya dalam m^2) per atau dibagi dengan volume penukar kalor yang menempati ruang dalam m^3 . Jadi dimensi kekompakan penukar kalor adalah $[m^2/m^3]$. Apabila ditinjau dari kekompakan luas permukaan perpindahan panas ini, suatu penukar kalor dikategorikan sebagai penukar kalor kompak bila luas permukaan perpindahan panas per volumenya lebih besar dari $700[m^2/m^3]$. Sedangkan yang nilainya kurang dari nilai itu disebut penukar kalor tidak atau kurang kompak. Radiator mobil dan kondenser AC split merupakan dua contoh penukar kalor kompak.

- c. Jenis penukar kalor berdasarkan profil konstruksi permukaan

Berdasarkan profil konstruksi permukaan, penukar kalor yang banyak digunakan di industri antara lain dengan konstruksi tabung dan pipa (shell and tube), pipa bersirip (tube with extended surfaces / fins and tube), dan penukar kalor pelat (plate heat exchanger).

Berikut ini akan diuraikan satu persatu dari setiap jenis penukar kalor tersebut:

- Tipe tabung dan pipa (shell and tube)

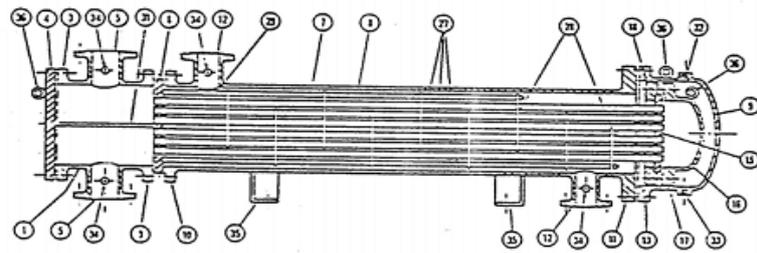
Tipe tabung dan pipa merupakan jenis penukar kalor yang paling banyak digunakan di industri khususnya industri perminyakan. Jenis ini terdiri dari suatu tabung dengan diameter cukup besar yang di dalamnya berisi seberkas pipa

dengan diameter relatif kecil seperti diperlihatkan pada gambar 2.1. Salah satu fluida yang dipertukarkan energinya dilewatkan di dalam pipa atau berkas pipa sedang fluida yang lainnya dilewatkan di luar pipa atau di dalam tabung.

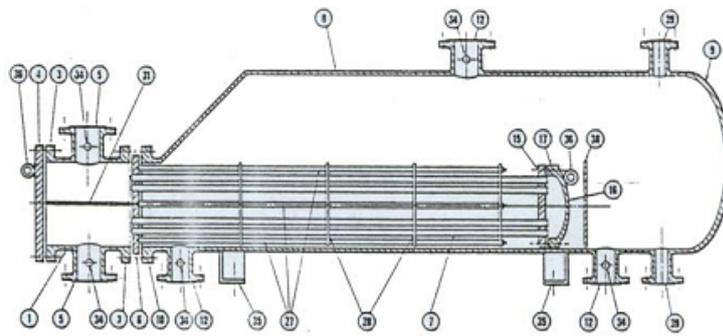
Konstruksi dari penukar kalor jenis ini sangat banyak. Salah satu contohnya diperlihatkan pada gambar 2.1, yaitu jenis dengan konstruksi “fixed tube sheet” artinya pelat pemegang pipa-pipa pada kedua ujung pipa, keduanya memiliki konstruksi yang tetap (tidak dapat bergeser secara aksial dalam arah sumbu tabung relative antara satu sisi dengan sisi lainnya) seperti terlihat pada gambar 2.1c. Contoh yang lain adalah jenis “floating tube sheet” artinya salah satu pelat pemegang pipa-pipa pada kedua ujung pipa dapat bergerak relatif terhadap satunya karena tidak terjepit oleh flens (mengambang) seperti ditunjukkan pada gambar 2.1a.

Pergerakan relatif ini dimaksudkan sebagai kompensasi akibat pertambahan panjang bila terjadi perubahan temperatur pada pipa sehingga tidak memberikan tambahan beban gaya pada baut pengencang flens tabung di luar pipa. Hal ini selain untuk alasan kekuatan bahan juga dimaksudkan untuk keamanan dalam hal menghindari kebocoran.

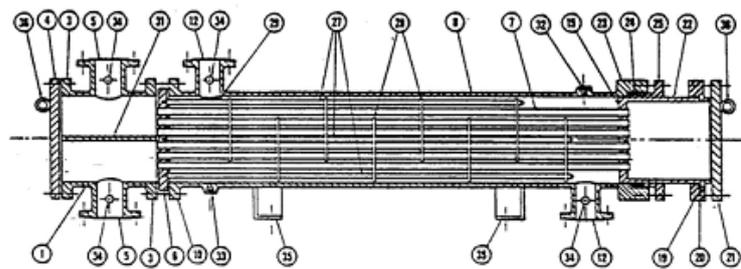
Pada gambar 2.1b, nampak bahwa diameter tabung tidak sama sepanjang penukar kalor. Pebesar diameter dimaksudkan untuk menampung perubahan fasa dari fluida yang berada di luar pipa dan di dalam tabung. Alat ini diaplikasikan untuk proses penguapan atau pendidihan fluida di luar pipa. Jenis ini sering disebut dengan jenis ketel (kettle)



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.1. Penukar kalor tipa tabung dan pipa (shell and tube)

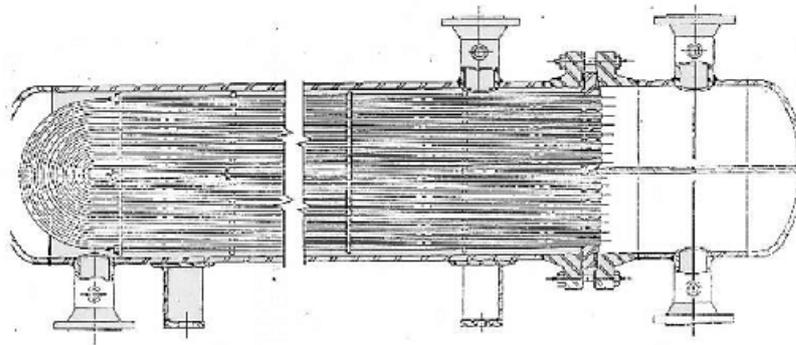
Nomenklatur dari gambar 1 :

1. Tabung (shell)
2. Tutup tabung (shell cover)
3. Flens sisi alur (shell flange channel end)
4. Flens sisi tutup tabung (shell flange cover end)
5. Nosel (shell nozzle)
6. Pemegang pipa mengambang (floating tube sheet)
7. Penutup tabung mengambang (floating head cover)
8. Flens mengambang (floating head flange)
9. Peralatan di belakang flens (floating head backing device)
10. Pemegang pipa tetap (stationary tubesheet)
11. Kanal atau tutup tetap (channel or stationary head)
12. Tutup kanal (channel cover)
13. Nosel kanal (Channel nozzle)
14. Batang penguat dan pemisah (tie rod & spacers)
15. Bafel atau pelat pendukung (baffles or support plate)
16. Bafel penahan semprotan (impingement baffle)
17. Partisi laluan (pass partition)
18. Penghubung pengeluaran gas (vent connection)
19. Penghubung tempat pembuangan (drain connection)
20. Tempat alat ukur (instrument connection)
21. Tempat penopang (support saddles)
22. Lobang tempat untuk mengangkat (lifting lugs)
23. Pipa-pipa (tubes)

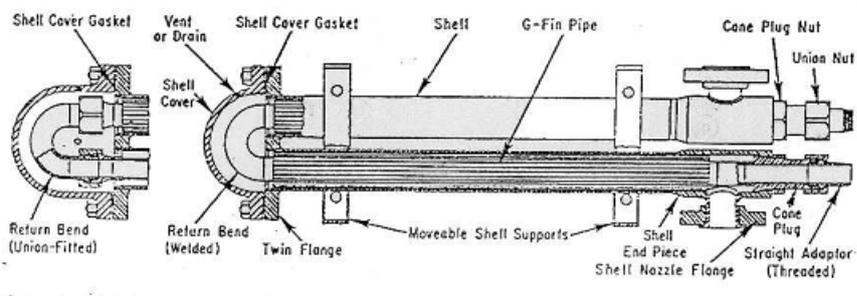
24. Weir penyambung alat untuk melihat ketinggian cairan (liquid level connection)

Selain jenis seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.1, untuk tipe tabung dan pipa masih ada jenis lain yang banyak pula dipergunakan di industri yaitu tipe pipa U (U tube type) seperti diperlihatkan pada gambar 2.2 dan tipe dua pipa (double pipe type) seperti diperlihatkan pada gambar 2.3. Pada jenis yang terakhir ini setiap tabung berisi berkas pipa masing-masing.

Fluida yang dipertukarkan energinya dalam penukar kalor tipe tabung dan pipa ini dapat berwujud cair dan cair atau cair dan gas, atau cair dan cair dalam proses perubahan fasa menjadi gas.



Gambar 2.2. Penukar kalor tabung dan pipa tipe pipa U

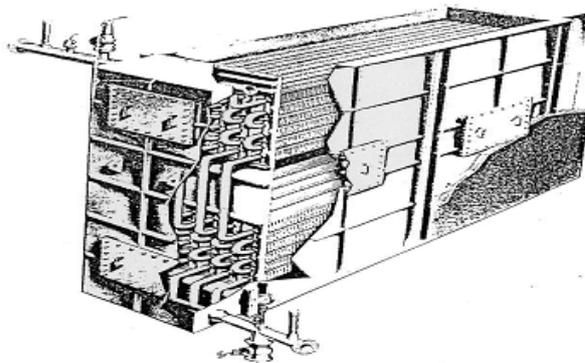


Gambar2.3. Penukar kalor tabung dan pipa tipe dua pipa (double pipe)

- Tipe pipa bersirip (Fins and tube)

Salah satu contoh penukar kalor tipe pipa bersirip ini diperlihatkan pada gambar 2.4. Contoh yang lain banyak dijumpai di lapangan antara lain radiator mobil, kondensor dan evaporator mesin pendingin dan masih banyak lagi yang lain. Pada umumnya penukar kalor jenis pipa bersirip ini dipergunakan untuk fluida cair dan gas dimana fluida gas dilalukan di luar pipa, yaitu bagian yang bersirip. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan efektivitas transfer energi karena biasanya pada sisi gas koefisien perpindahan panas memiliki nilai yang kecil sehingga untuk kompensasi agar laju transfer energinya meningkat diperlukan luas permukaan perpindahan panas yang relatif tinggi.

Penukar kalor tipe pipa bersirip juga bermacam-macam konstruksinya, antara lain penampang pipanya tidak selalu lingkaran, artinya banyak sekali pipa jenis pipih, oval, dan persegi yang dilengkapi dengan sirip.

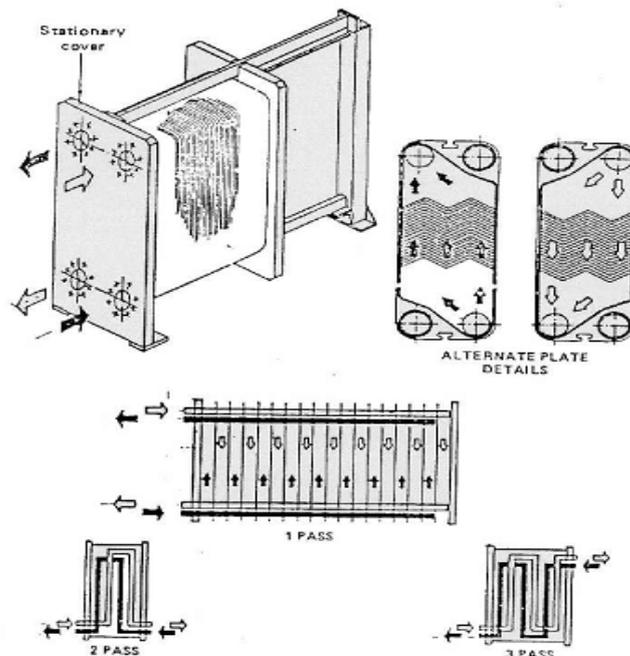


Gambar 2.4. Penukar kalor tipe pipa bersirip (fins and tube)

- Tipe pelat (plate heat exchanger)

Penukar kalor tipe pelat merupakan penukar kalor yang sangat kompak karena memiliki kekompakan yang sangat tinggi. Penukar kalor jenis ini terdiri dari pelat-pelat yang sudah dibentuk dan ditumpuk-tumpuk sedemikian rupa

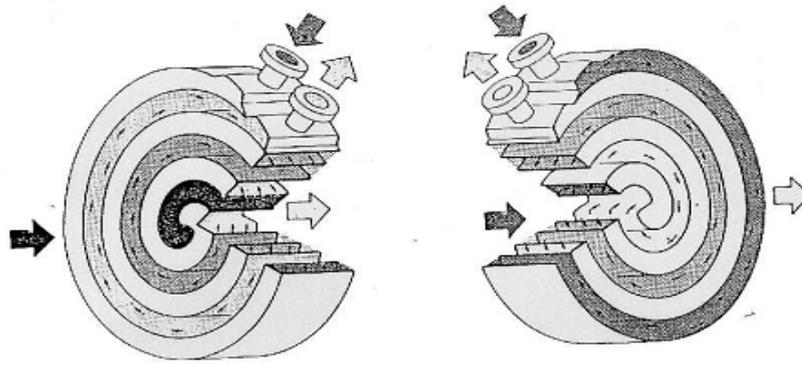
sehingga alur aliran untuk suatu fluida akan terpisahkan oleh pelat itu sendiri terhadap aliran fluida satunya serta dipisahkan dengan gasket. Jadi kedua fluida yang saling dipertukarkan energinya tidak saling bercampur. Salah satu contoh penukar kalor tipe pelat ini diperlihatkan pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Penukar kalor tipe pelat (plate heat exchanger)

- Tipe spiral (spiral heat exchanger)

Penukar kalor tipe spiral diperlihatkan pada gambar 2.6. Arah aliran fluida menelusuri pipa spiral dari luar menuju pusat spiral atau sebaliknya dari pusat spiral menuju ke luar. Permukaan perpindahan panas efektif adalah sama dengan dinding spiral sehingga sangat tergantung pada lebar spiral dan diameter serta berapa jumlah spiral yang ada dari pusat hingga diameter terluar.



Gambar 2.6. Penukar kalor tipe spiral

d. Klasifikasi penukar kalor berdasarkan susunan aliran fluida.

Yang dimaksud dengan susunan aliran fluida di sini adalah berapa kali fluida mengalir sepanjang penukar kalor sejak saat masuk hingga meninggalkannya serta bagaimana arah aliran relatif antara kedua fluida (apakah sejajar/parallel, berlawanan arah/counter atau bersilangan/cross). Berdasarkan berapa kali fluida melalui penukar kalor dibedakan jenis satu kali laluan atau satu laluan dengan multi atau banyak laluan. Pada jenis satu laluan, masih terbagi ke dalam tiga tipe berdasarkan arah aliran dari fluida yaitu:

- Penukar kalor tipe aliran berlawanan

Yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima panas saat keluar penukar kalor lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor saat meninggalkan penukar kalor. Dengan teori seperti ini jenis penukar kalor berlawanan arah merupakan penukar kalor yang paling efektif.

- Penukar kalor tipe aliran sejajar

Yaitu bila arah aliran dari kedua fluida di dalam penukar kalor adalah sejajar. Artinya kedua fluida masuk pada sisi yang satu dan keluar dari sisi yang lain. Pada jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar. Dengan demikian temperatur fluida yang menerima panas tidak akan pernah mencapai temperatur fluida yang memberikan panas saat keluar dari penukar kalor. Jenis ini merupakan penukar kalor yang paling tidak efektif.

- Penukar kalor dengan aliran silang

Artinya arah aliran kedua fluida saling bersilangan. Contoh yang sering ditemui adalah radiator mobil dimana arah aliran air pendingin mesin 12 yang memberikan energinya ke udara saling bersilangan. Apabila ditinjau dari efektivitas pertukaran energi, penukar kalor jenis ini berada diantara kedua jenis di atas. Dalam kasus radiator mobil, udara melewati radiator dengan temperatur rata-rata yang hampir sama dengan temperatur udara lingkungan kemudian memperoleh panas dengan laju yang berbeda di setiap posisi yang berbeda untuk kemudian bercampur lagi setelah meninggalkan radiator sehingga akan mempunyai temperatur yang hampir seragam.

- e. Jenis penukar kalor berdasarkan jumlah fluida yang saling dipertukarkan energinya.

Pada umumnya penukar kalor beroperasi dengan dua fluida (keduanya dapat merupakan zat yang sama). Namun demikian ada pula penukar kalor yang

dirancang untuk beroperasi dengan tiga jenis fluida misalnya yang sering digunakan pada instalasi proses pemisahan udara (yaitu antara refrigeran, oksigen, dan nitrogen).

f. Klasifikasi penukar kalor berdasarkan mekanisme perpindahan panas yang dominan

Berdasarkan mekanisme perpindahan panas yang dominan, penukar kalor dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis antara lain:

- Penukar kalor tipe konveksi satu fasa (konveksi dapat secara alamiah atau paksa),

Dimana mekanisme perpindahan panas yang terjadi didominasi oleh mekanisme konveksi dan selama proses perpindahan panas tidak terjadi perubahan fasa pada kedua fluida yang saling dipertukarkan energinya. Contoh penukar kalor jenis ini adalah radiator mobil, pendingin pelumas dengan air, dan lain-lain.

- Penukar kalor tipe konveksi dua fasa

Dimana mekanisme konveksi masih dominan namun salah satu dari fluida mengalami perubahan fasa, misalnya evaporator AC, kondenser dari PLTU atau AC, dan lain-lain.

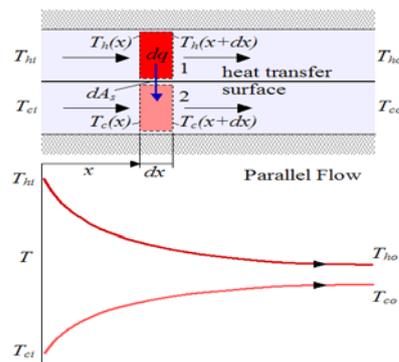
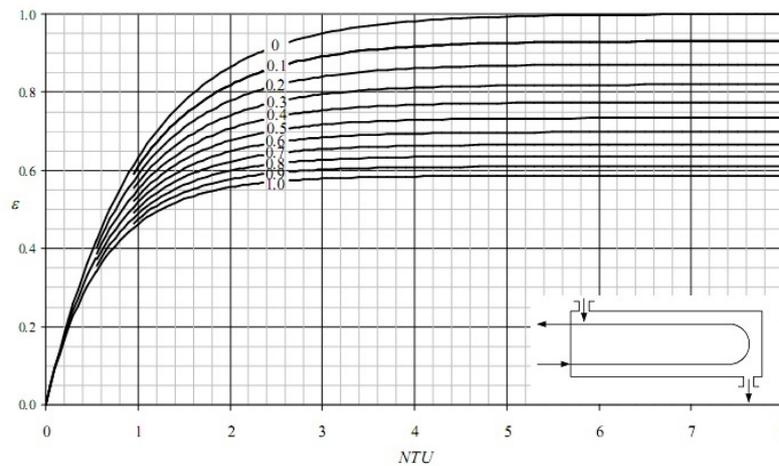
- Penukar kalor tipe konveksi dan radiasi

Dimana mekanisme radiasi dan konveksi sama-sama dominan seperti yang terjadi pada generator uap tipe pipa air dimana air yang 13 akan diuapkan

mengalir di dalam pipa - pipa sedangkan api atau gas hasil pembakaran yang dipergunakan untuk memanaskan air berada di luar pipa-pipa tersebut.

2.4 Effectiveness

Secara umum efektivitas (*effectiveness*) adalah kemampuan heat exchanger untuk memindahkan panas. Namun untuk mendefinisikan *effectiveness* alat penukar panas lebih lanjut, pertama kita harus menentukan kemungkinan laju perpindahan panas maksimum (*maximum possible heat transfer rate*), $q_{\max P}$ ada alat penukar panas. Laju perpindahan panas ini secara prinsip dapat dicapai pada alat penukar panas parallel flow, gambar 2.1, dengan panjang tak terhingga.



Gambar 2.7 Distribusi temperatur untuk paralelflow heat exchanger

Alat penukar panas pada kondisi ini, kemungkinan perbedaan temperature maksimum pada fluida adalah $T_{h,i} - T_{c,i}$. Untuk menggambarkan hal ini, perhatikan kondisi dimana $C_c < C_h$ dari persamaan 1 dan 2, maka $[dT_c] > [dT_h]$.

$$dq = - \dot{m}_h C_{p,h} dT_h = - C_h dT_h \quad 1$$

$$dq = \dot{m}_c C_{p,c} dT_c = C_c dT_c \quad 2$$

Kemudian fluida dingin akan mengalami perubahan temperatur yang besar dan jika $L \rightarrow \infty$, maka fluida dingin tersebut akan dipanaskan mencapai panas ($T_{c,o} = T_{h,i}$). Berdasarkan persamaan maka akan didapat persamaan 3.

$$C_c < C_h : q_{\max} = C_c (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad 3$$

Demikian pula jika $C_h < C_c$ fluida panas akan mengalami perubahan temperature terbesar dan akan menjadi dingin pada temperature masukan dari fluida yang dingin ($T_{h,o} = T_{c,i}$). Kemudian dari persamaan 4 maka didapatkan persamaan 5.

$$q = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad 4$$

$$C_h < C_c : q_{\max} = C_h (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad 5$$

Dari hasil tersebut kita dapatkan kondisi umum :

$$q_{\max} = C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad 6$$

Dimana C_{\min} sama dengan C_c atau C_h , mana yang lebih kecil. Untuk temperature masuk fluida panas dan dingin yang telah diketahui, dari persamaan 6

¹Indra Wahyudi, 2012, *Rancang Bangun Heat Exchanger shell and tube single phase*, Fakultas teknik, Universitas Diponegoro, halaman 6.

²Jussi Saari, *HEAT EXCHANGER DIMENSIONING*, LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT Energy, halaman 37.

³Ibid, halaman 36.

⁴Ibid, halaman 36.

⁵Ibid, halaman 36.

⁶Indra Wahyudi, Op Cit, halaman 7.

diatas dapat digunakan untuk menghitung kemungkinan besarnya laju perpindahan panas maksimum yang dialami oleh alat penukar panas.

Sekarang sangat logis untuk mendefinisikan effectiveness (ε) sebagai perbandingan antara laju perpindahan panas actual untuk sebuah alat penukar panas pada kemungkinan laju perpindahan panas maksimum, dan dinyatakan sebagai,

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{\max}}$$

Dari persamaan 3, 5 dan 7 diatas didapat bahwa :

$$\varepsilon = \frac{C_h(T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})}$$

atau

$$\varepsilon = \frac{C_c(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{\min}(T_{h,i} - T_{c,i})}$$

Dari definisi effectiveness, yang tidak berdimensi harus pada range $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Jika ε , $T_{h,i}$ dan $T_{c,i}$ diketahui, laju perpindahan panas aktual untuk alat penukar panas dapat ditentukan dengan persamaan

$$q = \varepsilon C_{\min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad 7$$

Untuk setiap alat penukar panas itu dapat ditunjukkan bahwa :

$$\varepsilon = f \left(NTU, \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \quad 8$$

dimana C_{\min}/C_{\max} adalah sama dengan C_c/C_h atau C_h/C_c , tergantung pada besaran relatif antara laju kapasitas fluida panas dan dingin.

⁷Ibid.

⁸Indra Wahyudi, 2012, *Rancang Bangun Heat Exchanger shell and tube single phase*, Fakultas teknik, Universitas diponegoro, halaman 7.

2.5 Number of Thermal Unit(NTU)

Jumlah perpindahan panas Number of Thermal Unit (NTU) adalah metode atau parameter yang digunakan untuk menghitung laju perpindahan panas pada alat penukar panas, yang kegunaannya sangat luas pada analisis alat penukar panas dan didefinisikan sebagai,

$$NTU = \frac{UA}{C_{\min}} \quad 9$$

Kemudian itu menyatakan laju perpindahan panas per derajat perbedaan temperatur rata-rata antara fluida.

2.6 Hubungan Effectiveness - NTU

Untuk menentukan bentuk spesifik dari hubungan Effectiveness – NTU, persamaan 12, dengan memperhatikan alat penukar aliran parallel $C_{\min} = C_h$, maka dari persamaan 9 kemudian kita dapatkan:

$$\varepsilon = \frac{T_{hi} - T_{ho}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad 10$$

dan dari persamaan 2 dan 4 kemudian didapat bahwa,

$$\frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{h C_p h}{c C_p c} = \frac{T_{co} - T_{ci}}{T_{hi} - T_{ho}} \quad 11$$

Sekarang perhatikan persamaan 15 dibawah ini:

$$\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right) = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad 12$$

Dari persamaan 15 dapat dinyatakan sebagai:

⁹JussiSaari, *HEAT EXCHANGER DIMENSIONING*, LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT Energy, halaman 43.

¹⁰IndraWahyudi, Op Cit, halaman 8.

¹¹JussiSaari, *HEAT EXCHANGER DIMENSIONING*, LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT Energy, halaman 51.

¹²Indra Wahyudi, 2012, *RancangBangun Heat Exchanger shell and tube single phase*, Fakultasteknik, Universitasdiponegoro, halaman8.

$$\ln \left(\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \right) = - \frac{UA}{C_{min}} \left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \quad 13$$

Atau dari persamaan 12,

$$\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} = \exp \left\{ -NTU \left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \right\} \quad 14$$

Dengan menyusun suku sebelah kiri persamaan ini sebagai berikut:

$$\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{co} - T_{ci}} = \frac{T_{ho} - T_{hi} + T_{hi} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} \quad 15$$

Dan memasukkan untuk T_{co} dari persamaan 14, sehingga didapat:

$$\frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} = \frac{(T_{ho} - T_{hi}) + (T_{hi} - T_{ci}) - (C_{min}/C_{max})(T_{hi} - T_{ho})}{T_{hi} - T_{ci}} \quad 16$$

Atau dari persamaan 13,

$$\begin{aligned} \frac{T_{ho} - T_{co}}{T_{hi} - T_{ci}} &= - + 1 - (C_{min}/C_{max}) \\ &= 1 - \left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \end{aligned} \quad 17$$

Masukkan persamaan diatas dalam persamaan 17 dan menjawab untuk ε , kemudian kita dapatkan untuk alat penukar panas aliran paralel (parallel-flow-heat exchanger),

$$= \frac{1 - \exp\{-NTU(1 + (C_{min}/C_{max}))\}}{\{1 + (C_{min}/C_{max})\}} \quad 18$$

Karena akan didapat hasil yang sama persis untuk $C_{min}=C_c$, persamaan 21 berguna untuk setiap alat penukar panas aliran paralel, tanpa memperhatikan apakah laju kapasitas panas minimum terjadi pada fluida panas atau dingin.

¹³Ibid.

¹⁴Ibid.

¹⁵Ibid,halaman 9.

¹⁶Ibid,halaman 9.

¹⁷Ibid,halaman 9.

¹⁸JussiSaari, *HEAT EXCHANGER DIMENSIONING*, LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT Energy, halaman 45.

2.7 Hubungan Effectiveness – NTU pada Alat Penukar Panas Aliran sejajar (Paralel-Flow)

Untuk alat penukar panas aliran sejajar (Paralel-flow) dengan satu fluida bercampur (mixed) sedangkan fluida yang lain tidak bercampur (unmixed),

$$= (1/C_r) \{1 - \exp(C_r(1 - \exp(-NTU)))\} \quad 19$$

jika C_{\max} pada fluida yang bercampur (mixed) dan C_{\min} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) atau,

$$= 1 - \exp[C_r^{-1}\{1 - \exp(-C_r(NTU))\}] \quad 20$$

jika C_{\max} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) dan C_{\min} pada fluida yang bercampur (mixed).

Dalam bentuk perhitungan desain alat penukar panas, akan lebih mudah menggunakan hubungan ε -NTU dalam bentuk,

$$NTU = f\left(\varepsilon, \frac{C_{\min}}{C_{\max}}\right) \quad 21$$

Dari persamaan 24 akan didapat persamaan sebagai berikut:

$$NTU = -\ln\left\{1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - C_r)\right\} \quad 22$$

jika C_{\max} pada fluida yang bercampur (mixed) dan C_{\min} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) atau,

$$NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln\{C_r \ln(1 -) + 1\} \quad 23$$

jika C_{\max} pada fluida yang tidak bercampur (unmixed) dan C_{\min} pada fluida yang bercampur (mixed).

¹⁹Ibid, halaman, 47.

²⁰Indra Wahyudi, 2012, *Rancang Bangun Heat Exchanger shell and tube single phase*, Fakultasteknik, Universitas diponegoro, halaman 10.

²¹Indra Wahyudi, 2012, *Rancang Bangun Heat Exchanger shell and tube single phase*, Fakultasteknik, Universitas diponegoro, halaman 10.

²²Ibid.

²³Jussi Saari, *HEAT EXCHANGER DIMENSIONING*, LAPPEENRANTA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT Energy, halaman 47.

