

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Panas atau kalor merupakan salah satu bentuk energi. Panas dapat berpindah dari suatu zat ke zat lain. Panas dapat berpindah melalui tiga cara yaitu :

2.1.1 Radiasi

Radiasi adalah perpindahan panas melalui gelombang dari suatu zat ke zat yang lain. Jadi, selama memindahkan energi, panas tidak memerlukan apapun. Pada hakekatnya, proses perpindahan panas secara radiasi terjadi dengan perantaraan foton dan juga gelombang elektromagnetik. Apabila sejumlah energi panas menimpa suatu permukaan, maka energi panas tersebut akan dipantulkan sebagian, dan sebagian lainnya akan diserap ke dalam dinding dan sebagiannya lagi akan menembus bahan. Contoh peristiwa radiasi antara lain panas matahari yang dapat mengeringkan pakaian yang dijemur. Ciri – ciri dari perpindahan panas secara radiasi yaitu :

1. Perpindahan panas secara radiasi merambat lurus.
2. Tidak memerlukan media perantara selama memindahkan panas dari suatu zat ke zat lain.

2.1.2 Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan kalor melalui zat penghantar tanpa disertai perpindahan bagian-bagian zat itu. Perpindahan kalor dengan cara konduksi pada umumnya terjadi pada zat padat. Suatu zat dapat

menghantar kalor disebut konduktor, seperti berbagai jenis logam. Sedangkan zat penghantar kalor yang buruk disebut isolator yang pada umumnya benda-benda non logam. Contoh konduksi adalah memanaskan batang besi di atas nyala api. Apabila salah satu ujung besi dipanaskan, kemudian ujung yang lain dipegang, maka semakin lama ujung yang dipegang semakin panas. Hal ini menunjukkan bahwa kalor atau panas berpindah dari ujung besi yang dipanaskan ke ujung besi yang dipegang. Dan dapat diambil kesimpulan pula bahwa berpindahnya kalor berasal dari bagian yang memiliki temperatur tinggi ke bagian yang memiliki temperatur yang rendah. Energi kalor pada ujung batang tersebut akan memindahkan sebagian energi kepada molekul dan elektron yang membangun bahan tersebut.



Gambar 2.1 Perpindahan Panas secara Konduksi

Sifat bahan yang digunakan untuk menyatakan bahwa bahan tersebut merupakan konduktor atau isolator ialah koefisien konduksi termal. Apabila nilai koefisien ini tinggi, maka bahan mempunyai kemampuan mengalirkan kalor dengan cepat. Sedangkan untuk isolator pasti memiliki nilai koefisien konduktivitas yang kecil. Pada umumnya, bahan yang dapat menghantar arus

listrik dengan sempurna (logam) adalah penghantar panas yang baik dan sebaliknya apabila bahan tidak dapat menghantarkan listrik maka itu adalah penghantar panas yang buruk.

2.1.3 Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah perpindahan panas melalui zat penghantar yang disertai dengan perpindahan bagian-bagian zat itu. Pada umumnya zat penghantar yang dipakai berupa zat cair dan gas. Kalor berpindah karena adanya aliran zat yang dipanaskan akibat adanya perbedaan massa jenis (berat jenis). Massa jenis bagian yang dipanaskan lebih kecil daripada massa jenis bagian zat yang tidak dipanaskan. Contoh konveksi adalah memanaskan air dalam panci hingga mendidih. Peristiwa sehari-hari yang berhubungan dengan konveksi kalor adalah terjadinya angin darat dan angin laut.

Proses perpindahan panas secara konveksi hanya terjadi pada permukaan bahannya saja. Keadaan permukaan dan keadaan di sekeliling dari permukaan itulah yang paling utama. Perpindahan panas secara konveksi tentu hanya terjadi pada zat yang mengalir.

2.2 Alat Penukar Kalor

Ada banyak peralatan penukar kalor pada suatu pembangkit listrik seperti ketel uap (boiler), pemanas lanjut (*superheater*), pendingin minyak pelumas (*oil cooler*), unit pemanas air umpan (*heater*), kondenser dsb. Jika dilihat dari fungsinya, semua alat penukar kalor memiliki fungsi yang sama yaitu menukarkan energi yang dimiliki oleh suatu fluida atau zat ke fluida atau zat lainnya. Jenis-jenis alat penukar kalor dapat diklasifikasi sebagai berikut :

2.2.1 Alat Penukar Kalor Berdasarkan Proses Perpindahan Panas yang Terjadi

Ada dua macam alat penukar panas berdasarkan proses perpindahan panas yang terjadi, yaitu :

1. Tipe kontak langsung

Alat penukar panas tipe kontak langsung adalah tipe alat penukar kalor dimana antara dua zat yang dipertukarkan energinya dicampur atau dikontakkan secara langsung. Contohnya adalah *Cooling Tower* untuk mendinginkan air pendingin kondenser pada PLTP maupun 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 energi yang dipindahkan sedikit. Contoh lainnya adalah unit *desuperheater*. *Desuperheater* bekerja untuk mendinginkan uap panas lanjut, dimana pendinginannya menggunakan air agar temperatur uap turun.

2. Tipe kontak tidak langsung

Alat penukar panas tipe kontak tidak langsung adalah tipe alat penukar panas dimana antara kedua zat yang ditukarkan energinya dipisahkan oleh permukaan bidang padatan seperti dinding pipa, plat, dan lain sebagainya sehingga antara kedua zat tidak bercampur. Dengan demikian mekanisme perpindahan panas dimulai dari zat yang lebih tinggi temperaturnya memberikan energi panasnya kepada permukaan pemisah, lalu diteruskan ke zat yang berfungsi sebagai pendingin (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 alat penukar kalor tipe kontak tidak langsung ini antara lain radiator mobil, evaporator AC, pendingin pelumas pada *gearbox* dengan air, dsb. 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. Perbedaan utama antara alat penukar panas tipe kontak langsung dan tipe kontak tidak langsung adalah pada *heating surface areanya*. Pada jenis kontak langsung, luas permukaan perpindahan panas sangat tergantung pada luas kontak antara kedua zat, sedangkan pada tipe kontak tidak langsung, *heating surface areanya* adalah luas permukaan yang memisahkan kedua zat.

2.2.2 Alat Penukar Kalor Berdasarkan Tingkat Kekompakan Permukaan Pemindah Panas

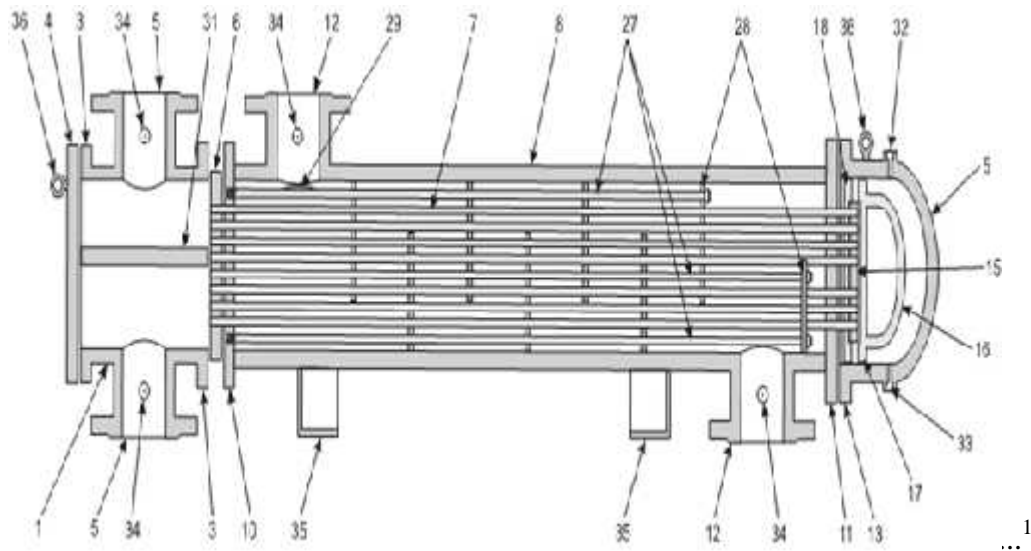
Maksud kata kekompakan luas permukaan perpindahan panas disini adalah permukaan efektif yang tersentuh oleh salah satu zat (biasanya diambil yang tertinggi nilainya dalam m^2) dibagi dengan volume penukar panas yang menempati ruang dalam m^3 .

2.2.3 Alat Penukar Kalor Berdasarkan Profil Konstruksi Permukaan

Berdasarkan profil konstruksi permukaan, alat penukar panas yang digunakan di perindustrian antara lain dengan konstruksi pipa dan tabung (*shell and tube heat exchanger*), pipa bersirip (*tube with extended surface / fins and tube*), dan penukar panas pelat (*plate heat exchanger*).

1. Tipe pipa dan tabung (*shell and tube*)

Alat penular panas tipe pipa dan tabung merupakan jenis penukar panas yang paling banyak digunakan termasuk di unit-unit pembangkit listrik. Jenis ini terdiri dari suatu tabung dengan diameter cukup besar yang di dalamnya berisi sekumpulan pipa dengan diameter yang kecil. Salah satu fluida dialirkan ke dalam pipanya, sementara fluida yang lainnya dialirkan ke dalam tabungnya.



Gambar 2.2 *Shell and Tube Heat Exchanger*

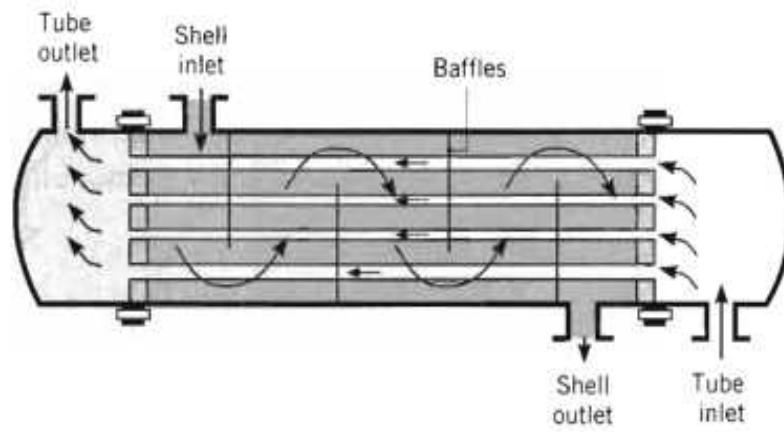
Keterangan :

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*)

¹ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.253

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 and spacers*)
15. *Baffle* pelat pendukung
16. *Impingement baffle*
17. *Pass partition*
18. Penghubung pengeluaran gas (*vent connection*)
19. Penghubung tempat pembuangan (*drain connection*)
20. Tempat alat ukur
21. Penopang (*saddles*)
22. *Lifting lugs*
23. Pipa-pipa (*tubes*)
24. Weir penyambung alat untuk melihat ketinggian cairan (*liquid level connection*)

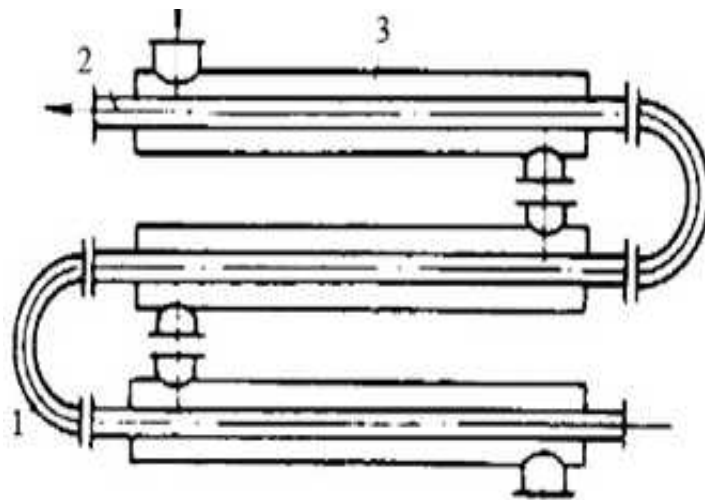
Selain bentuk *shell and tube* seperti gambar di atas, ada juga tipe lainnya yang sering dipakai di pembangkit listrik, yaitu tipe pipa U (*U-tube type*) dan tipe dua pipa (*double pipe type*).



....²

Gambar 2.3 Alat Penukar Kalor Tabung dan Tipe Pipa U

Pada *shell and tube heat exchanger* tipe pipa U ini memiliki kelebihan yaitu biasanya memiliki *heating surface area* yang lebih besar dengan volume *heat exchanger* yang lebih kecil sehingga memiliki kekompakan yang baik.



....³

Gambar 2.4 *Double Pipe Heat Exchanger*

Keterangan :

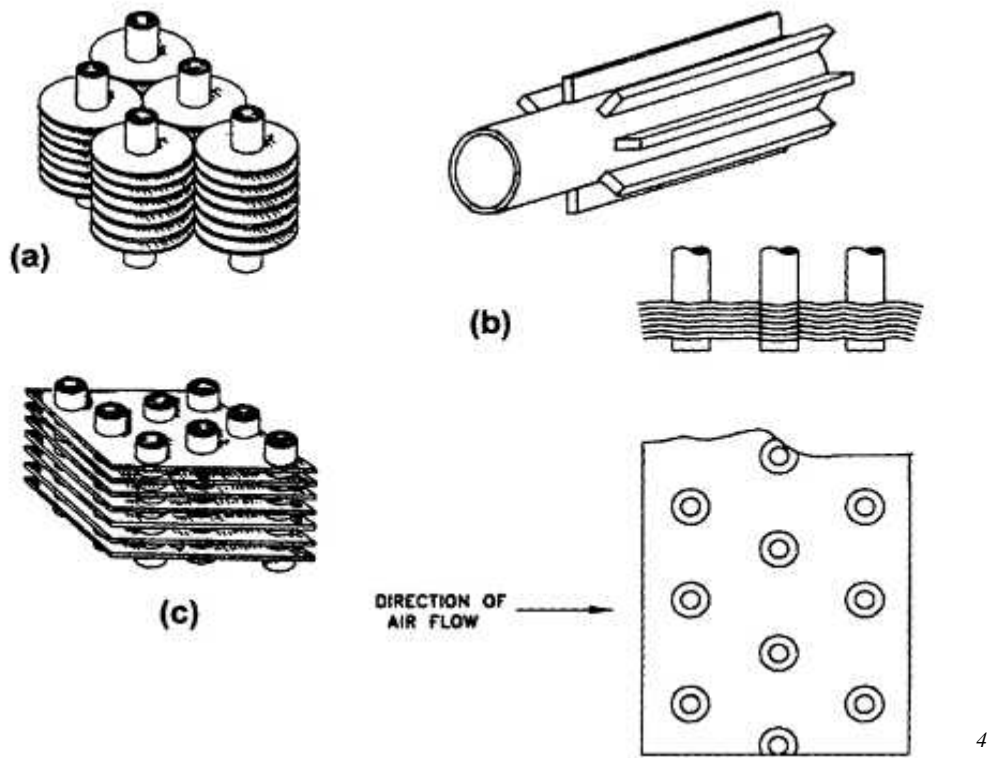
1. *Elbow Pipe*
2. *Internal pipe*
3. *External Pipe*

² Incropera, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, Hal. 707

³ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal. 4

2. Tipe pipa bersirip (*fins and tubes*)

Alat penukar kalor tipe pipa bersirip digunakan secara umum untuk fluida cair dan fluida gas, dimana fluida gas dialirkan di luar pipa, yaitu bagian yang bersirip. Hal ini dimaksudkan untuk meningkatkan efektivitas transfer energi karena biasanya pada sisi gas (bagian *fins*) memiliki koefisien perpindahan panas yang kecil sehingga sebagai dampaknya, diperlukan luas permukaan perpindahan panas yang relatif tinggi agar laju transfer energinya meningkat. Contoh *heat exchanger* dengan tipe pipa bersirip banyak digunakan pada radiator mobil, kondenser, evaporator mesin pendingin dsb.

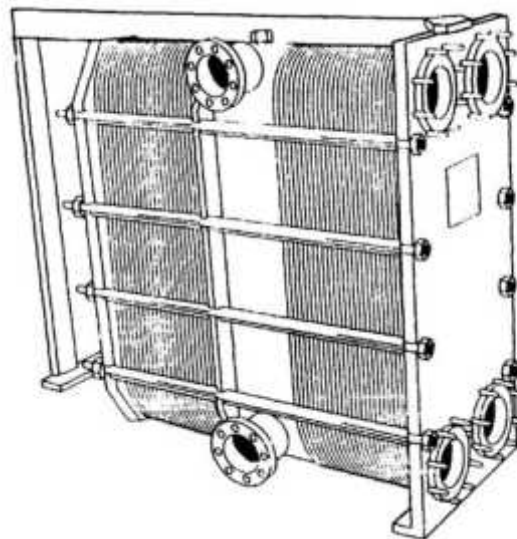


Gambar 2.5 Susunan *Fin* dan *Tube* pada Penukar Panas Tipe Pipa Bersirip

⁴ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.161

3. Tipe pelat (*plate heat exchanger*)

Alat penukar panas tipe pelat memiliki tingkat kekompakkan yang tinggi. Alat penukar panas ini terdiri dari pelat-pelat yang sudah dibentuk dan ditumpuk sedemikian rupa sehingga alur aliran untuk suatu fluida akan terpisahkan oleh pelat itu sendiri terhadap aliran fluida satunya dipisahkan dengan gasket. Jadi kedua fluida yang saling dipertukarkan energinya tidak saling bercampur.



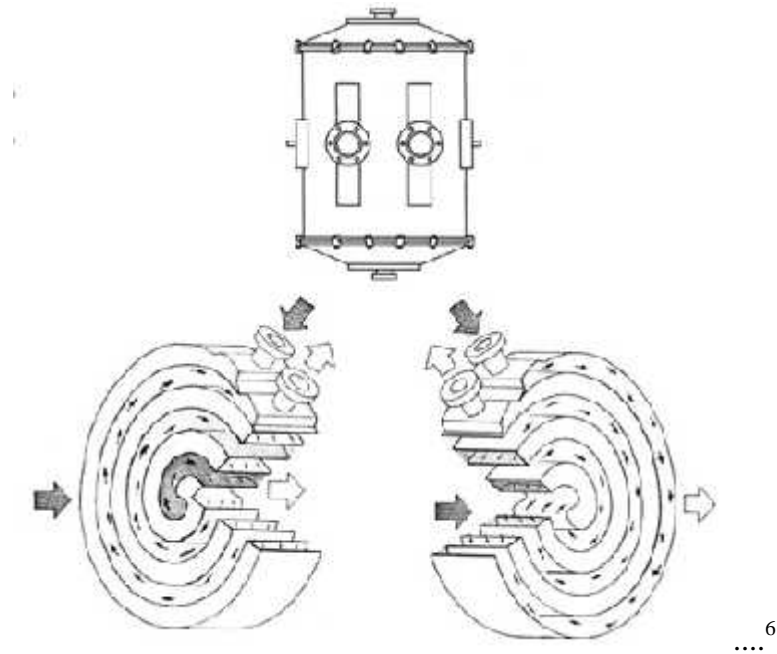
....⁵

Gambar 2.6 *Plate Heat Exchanger*

4. Tipe Spiral (*Spiral Heat Exchanger*)

Pada *spiral heat exchanger*, arah aliran fluida menelusuri pipa spiral dari luar menuju pusat spiral atau sebaliknya dari pusat spiral menuju keluar. Proses perpindahan panas akan efektif bergantung pada lebar spiral dan diameter serta jumlah spiral yang ada dari pusat hingga diameter terluar.

⁵ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.6



Gambar 2.7 *Spiral Heat Exchanger*

2.2.4 Alat Penukar Kalor Berdasarkan Susunan Aliran Fluida

Susunan aliran fluida didefinisikan sebagai jumlah berapa kali fluida mengalir sepanjang penukar panas sejak saat masuk hingga meninggalkannya serta jenis arah alirannya juga. Berdasarkan jumlah laluan yang dilakukan fluida melalui alat penukar panas dibedakan menjadi satu laluan dan banyak laluan.

1. Fluida yang mengalir satu kali melalui alat penukar panas.

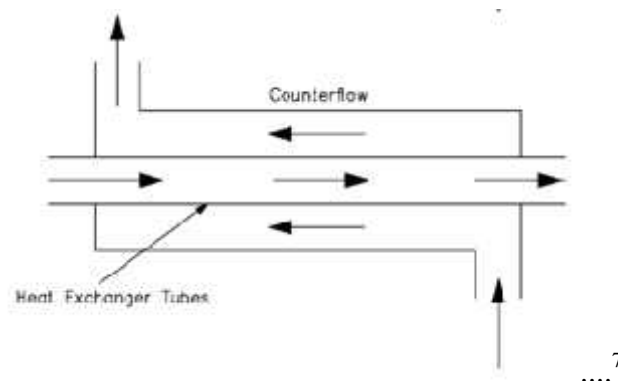
Pada alat penukar panas jenis ini, tipe aliran fluidanya dibedakan menjadi tiga macam, yaitu :

1.1 Penukar Panas Tipe Aliran Berlawanan

Penukar panas jenis ini diartikan bahwa kedua fluida mengalir dengan arah yang berlawanan. Pada tipe ini sangat dimungkinkan terjadinya tingginya temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar dari alat penukar panas dibandingkan dengan temperatur fluida yang memberikan panas saat

⁶ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.7

meninggalkan alat penukar panas. Bahkan idealnya apabila luas permukaan perpindahan panas adalah tidak terhingga dan tidak terjadi rugi-rugi panas ke lingkungan, maka temperatur fluida yang menerima panas saat keluar dari alat penukar panas bisa menyamai temperatur fluida yang memberikan panas saat memasuki penukar panas. Dengan teori seperti ini, maka jenis alat penukar panas dengan arah fluida yang berlawanan merupakan alat penukar panas yang paling efektif.



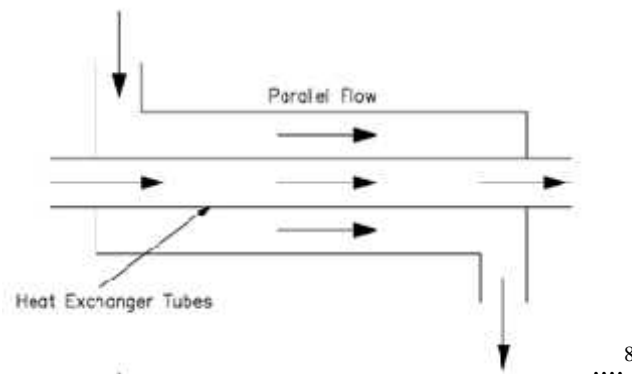
Gambar 2.8 Aliran *Counterflow* pada Penukar Panas

1.2 Penukar Panas Tipe Aliran Sejajar

Pada alat penukar panas jenis ini, kedua fluida (baik yang memberikan energi maupun yang menerima energi panas) memiliki satu arah aliran yang sama. Artinya, kedua fluida akan masuk dari arah sisi yang sama dan keluar juga pada sisi yang sama. Pada alat penukar panas jenis ini, temperatur fluida yang memberikan energi panasnya akan senantiasa lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki alat penukar panas hingga keluar. Oleh karena itu, fluida yang dipanaskan tidak akan pernah mencapai temperatur maksimal yang diharapkan sama dengan temperatur fluida yang memberikan energi panasnya semenjak dari sisi masuk alat penukar panas. Dengan demikian,

⁷ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.4

alat penukar panas jenis ini adalah yang paling tidak efektif digunakan untuk transfer panas.

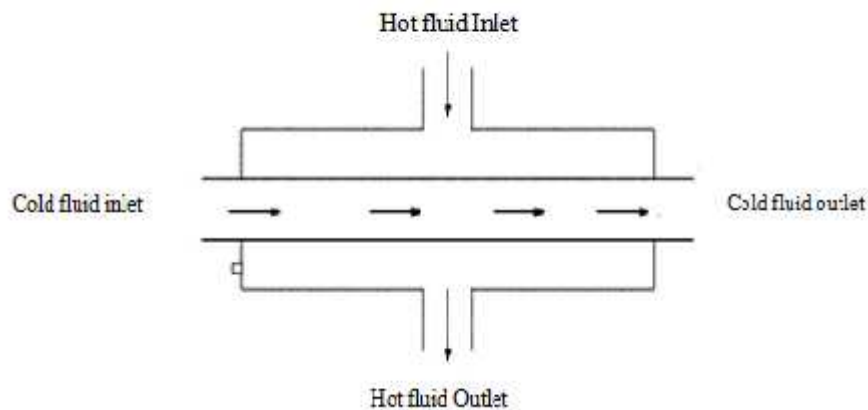


Gambar 2.9 Aliran *Parallel* pada Alat Penukar Panas

1.3 Alat Penukar Panas Tipe Aliran Silang

Alat penukar panas dengan tipe aliran bersilangan biasa dipakai pada radiator mobil. Arah aliran air pendingin mesin yang memberikan energi panasnya ke udara memiliki arah yang saling bersilangan dengan udara. Jenis ini memiliki tingkat keefektifan diantara alat penukar panas tipe aliran berlawanan dan searah. Pada 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.

⁸ T,Kuppan,*Heat Exchanger Design Handbook*,Hal.16



....⁹

Gambar 2.10 Aliran *Crossflow* pada Alat Penukar Panas

2. Fluida yang mengalir beberapa kali melalui alat penukar panas

Pada alat penukar panas untuk multi laluan, terbagi ke dalam beberapa tipe sesuai dengan arah aliran kedua fluida yang saling bertukaran energinya, antara lain :

- 2.1 Tipe gabungan antara aliran berlawanan dan bersilangan, misal pada tipe tabung dan pipa,
- 2.2 Tipe gabungan antara aliran sejajar dan bersilangan
- 2.3 Tipe gabungan antara aliran berlawanan, sejajar dan bersilangan
- 2.4 Tipe aliran fluida terbagi dan fluida bercampur, misal pada kondenser AC.

2.2.5 Alat Penukar Kalor Berdasarkan Jumlah Fluida yang Saling Ditransfer Energinya

Pada umumnya, alat penukar panas beroperasi menggunakan dua fluida (keduanya dapat merupakan zat yang sama). Namun, ada pula penukar panas yang menggunakan tiga jenis fluida, seperti pada instalasi pemisah udara yang terdiri

⁹ T.Kuppan, *Heat Exchanger Design Handbook*, Hal.18

dari refrigeran, oksigen dan nitrogen. Pada unit pemisah antara helium dan udara terdiri dari oksigen dan nitrogen serta penukar panas yang digunakan dalam proses sistesa gas amonia pada pabrik pupuk. Dengan demikian, berdasarkan jumlah fluida yang digunakan, ada dua kategori alat penukar panas, yaitu alat penukar panas dengan dua fluida dan alat penukar panas dengan lebih dari dua fluida kerja.

2.2.6 Alat Penukar Panas Berdasarkan Mekanisme Perpindahan Panas yang Dominan

Klasifikasi alat penukar panas berdasarkan mekanisme perpindahan panas yang dominan, alat penukar panas dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis yaitu :

1. Alat Penukar Panas tipe Konveksi Satu Fasa (Konveksi Alamiyah maupun Konveksi Paksa)

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

2. Alat Penukar Panas tipe Konveksi Dua Fasa

Mekanisme untuk perpindahan panas pada alat penukar panas tipe konveksi dua fasa adalah konveksi masih dominan namun salah satu fluida akan mengalami perubahan fasa, misalnya evaporator AC, kondenser PLTU dsb.

3. Alat Penukar Panas tipe Konveksi dan Radiasi

Mekanisme pada alat penukar panas tipe konveksi dan radiasi adalah bahwa radiasi dan konveksi sama-sama dominan seperti yang terjadi pada boiler uap tipe pipa air dimana air yang akan diuapkan mengalir di dalam pipa-pipa sedangkan api atau gas hasil pembakaran yang dipergunakan untuk memanaskan air berada di luar pipa-pipa tersebut.

2.3 *High Pressure Heater*

High Pressure Heater merupakan salah satu *heat exchanger* yang berfungsi untuk memanaskan air umpan (*feed water*) dari *Boiler Feed Pump* dimana media pemanasnya adalah uap ekstraksi yang diambil dari turbin tekanan tinggi. PLTU 3 Jawa Timur Tanjung Awar-Awar Tuban dilengkapi dengan tiga pemanas HP Heater yang disusun secara seri. Jenis *HP Heater* yang digunakan berjenis *Shell and Tube Heat Exchanger*. Air umpan akan disalurkan ke dalam *tubes* sedangkan uap ekstraksi akan disalurkan di luar *tube* (atau di bagian *shell*). Jika seperti itu, maka akan terjadi transfer panas dari uap ekstraksi ke air umpan. Kemudian, karena uap ekstraksi sudah kehilangan sebagian besar energi panasnya maka akan berubah menjadi uap basah bahkan menjadi air.

Karena disusun secara seri, maka air umpan yang dipanaskan menuju ke *Boiler* akan mengalami pemanasan secara bertingkat pula. Namun, tidak demikian dengan uap ekstraksinya. Tiap unit *HP Heater* memiliki sistem ekstraksi masing-masing. *HP Heater #1* mendapatkan uap ekstraksi dari *HP Turbine*, *HP Heater #2* mendapatkan uap ekstraksi dari *cold reheat*, dan *HP Heater #3* mendapatkan uap ekstraksi dari *IP Turbine*. Terdapat dua sistem drainase air pada *HP Heater* yaitu

normal drain dan *emergency drain*. Normal drain pada *HP Heater* akan mengalir secara alami tahap demi tahap menuju *deaerator*, sedangkan *emergency drain* akan langsung mengalir menuju *condensor*.



Gambar 2.11 *High Pressure Heater*