

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

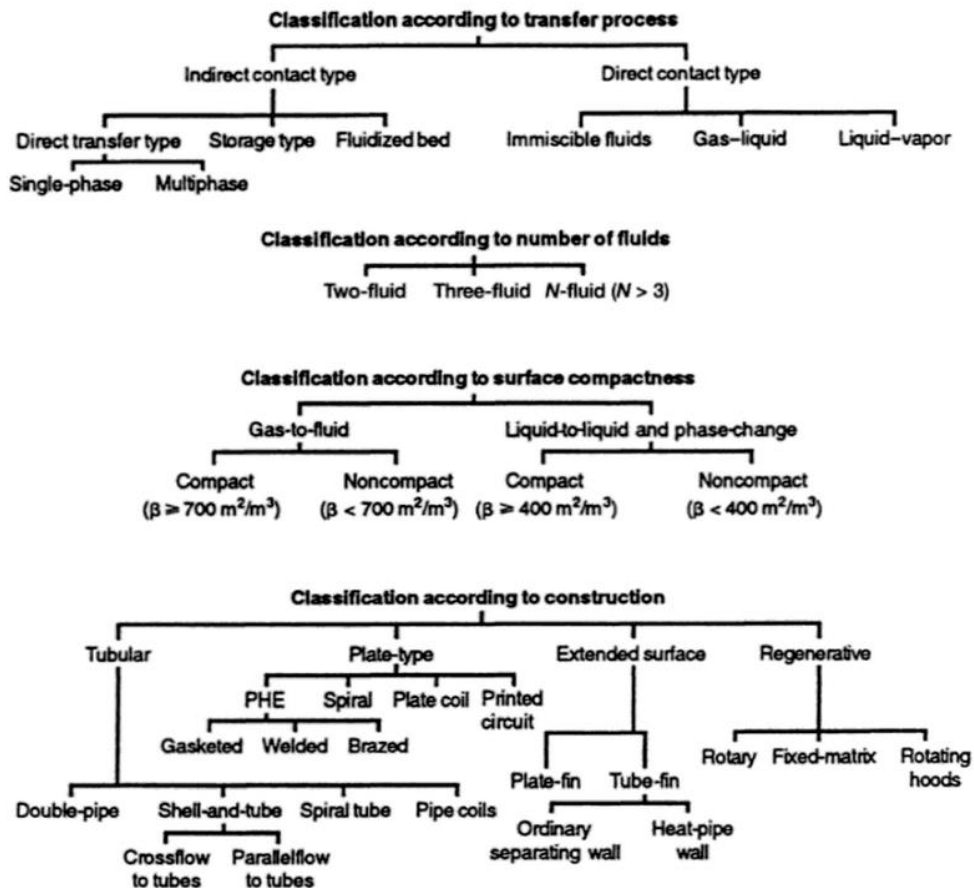
2.1 Landasan Teori

2.1.1 Pengenalan Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor/ heat exchanger adalah peralatan yang dipergunakan untuk mentransfer kalor/panas antar 2 fluida/ lebih, atau diantara fluida cair dengan permukaan padat, atau antara padatan dengan fluida cair, pada kondisi temperatur 2 fluida yang memiliki perbedaan dalam suatu kontak panas. Dalam proses penukar panas, hanya melibatkan 2 fluida dalam kondisi suhu yang berbeda yang kemudian terjadi aliran kalor dari fluida yang bersuhu lebih tinggi ke fluida yang lebih rendah sehingga terjadi penurunan suhu fluida yang tujuannya ingin didinginkan dan biasanya tidak dipengaruhi panas eksternal. Aplikasi umum dalam proses penukar panas adalah merupakan proses yang termasuk di dalam pemanasan atau pendinginan dari aliran fluida dimana fluida tersebut yang menjadi objeknya, dapat juga merupakan proses kondensasi baik yang multi maupun tunggal.

Pada sebagian besar alat penukar kalor, fluida yang mengalami penukaran panas dapat terjadi dalam kondisi bersentuhan langsung. Pada sebagian besar alat penukar kalor, perpindahan kalor antar fluida dapat terjadi melalui dinding pemisah atau terjadi proses perpindahan panas keluar masuk dinding secara cepat / transien. Pada proses perpindahan panas yang terjadi, 2 fluida terpisah oleh media permukaan perpindahan panas yang secara ideal tidak boleh bercampur ataupun bocor. Beberapa contoh umum dari alat penukar panas penukar panas shell and tube , radiator kendaraan, kondensor pada pembangkit, evaporator (pipa boiler) , *cooling tower*. Dalam contoh lain, pembakaran maupun proses kimia juga dapat terjadi di dalam alat penukar panas, seperti misalnya pada ketel uap / boiler, pemanasan terjadi dengan bahan bakar. Perpindahan panas pada dinding pemisah umumnya dilakukan dengan proses konduksi dimana proses konduksi ini adalah salah satu mekanisme perpindahan panas yang terjadi melalui medium padat. Namun dalam penukar panas tipe pipa panas, pipa panas tidak hanya bertindak sebagai dinding pemisah, namun juga memfasilitasi proses perpindahan panas dalam konteks proses kondensasi, proses penguapan, ataupun proses konduksi fluida kerja yang berada di dalam pipa panas.

Hal terpenting dari *heat exchanger* adalah permukaan kontak panas. Hal ini menjadi penting karena pada permukaan inilah terjadi perpindahan panas dari satu fluida ke fluida lainnya atau dari suatu zat ke zat yang lain. Semakin luas bidang kontak yang dimiliki oleh *heat exchanger* tersebut, maka akan semakin tinggi nilai efisiensi perpindahan panasnya.



Gambar 2.1 Klasifikasi Alat penukar Kalor

Penukar panas terdiri dari elemen perpindahan panas seperti inti yang berisi permukaan perpindahan panas, dan elemen pendistribusian fluida seperti header, manifold, tangki, pipa saluran masuk dan keluar. Biasanya tidak ada bagian yang bergerak dalam penukar panas, kecuali seperti penukar regeneratif putar di mana inti elemen perpindahan panas digerakkan secara mekanis untuk berputar pada kecepatan tertentu dengan tujuan untuk proses perpindahan panas. Inti dari proses perpindahan panas adalah permukaan perpindahan kalor yang bersentuhan langsung dengan fluida dan melaluinya kalor dipindahkan secara konduksi. Bagian permukaan yang bersentuhan langsung dengan fluida panas dan dingin mentransfer panas di antara keduanya yang disebut sebagai permukaan primer atau permukaan langsung.

Klasifikasi penukar kalor dapat diklasifikasikan menurut proses perpindahan, jumlah fluida, dan mekanisme perpindahan kalor. Penukar panas konvensional diklasifikasikan lebih lanjut menurut jenis konstruksi dan pengaturan aliran. klasifikasi ini seperti yang dirangkum dalam Gambar. 2.1 .

2.1.2 Prinsip Perpindahan Panas

Prinsip perpindahan panas pada alat penukar kalor adalah berdasarkan hukum termodinamika I dan mekanisme perpindahan panas yang menyatakan bahwa “Energi tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan, hanya dapat diubah dari satu bentuk ke bentuk lainnya”. Pada proses perpindahan panas terjadi perpindahan energi panas. Perpindahan panas ini terjadi dari fluida yang bersuhu lebih tinggi ke fluida yang lebih rendah suhunya. Fluida yang lebih panas akan melepaskan sebagian kalornya kepada fluida yang dingin dan akan menerima energi tersebut, sehingga terjadi kesetimbangan termal atau mencapai suhu yang diinginkan. Perpindahan panas ini pada umumnya terjadi melalui dinding pemisah antar kedua fluida yang mengalami proses tersebut.

2.1.3 Mekanisme Perpindahan Panas

Terdapat 3 jenis mekanisme perpindahan panas pada alat penukar kalor. tiga mekanisme dasar tersebut adalah:

2.1.3.1 Proses Konduksi

Proses Konduksi adalah Perpindahan panas yang terjadi pada umumnya melalui medium padat (dinding pemisah antara fluida) akibat kontak langsung molekul-molekul padat. Ketika satu bagian dari suatu benda padat dipanaskan, energi kinetik molekul – molekul di bagian tersebut meningkat. Molekul – molekul yang bergetar lebih cepat ini kemudian bertumbukan dengan molekul – molekul di sekitarnya yang energinya lebih rendah menyebarkan panas ke seluruh benda. Nilai Q , Laju perpindahan panas secara konduksi dijelaskan didalam Hukum Fourier berikut :

$$Q = -k A \frac{dx}{dT} \dots\dots\dots(1)$$

dimana:

Q = laju perpindahan panas (W)

K = Konduktivitas termal material (W /m.K)

A = Luas permukaan perpindahan panas (m²)

dT/dx = Gradien temperatur (K/m)

2.1.3.2 Proses Konveksi

Perpindahan panas yang terjadi karena adanya pergerakan aliran fluida baik zat cair maupun zat gas. Dalam *heat exchanger*, konveksi terjadi antara fluida cair/gas dengan permukaan dinding . Konveksi dapat terjadi secara:

- Konveksi Alami (*Natural Convection*) : Gerakan fluida terjadi secara alami akibat perbedaan densitas yang disebabkan oleh perbedaan suhu. Sebagai contohnya adalah seperti air yang mendidih di dalam panci.
- Konveksi Paksa (*Forced Convection*) : Gerakan fluida disebabkan oleh gaya eksternal dari suatu alat seperti pompa atau kipas. Contohnya adalah aliran udara dari kipas di dalam radiator. Laju perpindahan panas konveksi dijelaskan oleh Hukum Pendinginan Newton :

$$Q : h . A . (T \text{ Permukaan} - T \text{ Fluida}) \dots\dots\dots(2)$$

Dimana :

h = Koefisien perpindahan panas secara konveksi (W/m².K)

$T \text{ Permukaan}$ = Suhu permukaan (K)

$T \text{ fluida}$ = Suhu fluida (K)

2.1.3.3 Proses Radiasi

Perpindahan panas secara Radiasi proses transfer panas yang terjadi dari energi yang dipancarkan materi pada gelombang elektromagnetik tanpa memerlukan medium perantara. Meskipun ada, pengaruh radiasi pada *heat exchanger* seringkali lebih kecil dibandingkan konduksi dan konveksi, terutama pada temperatur kerja yang tidak terlalu tinggi. Contoh dari perpindahan panas ini adalah pancaran sinar matahari yang terasa hangat.

2.1.4 Klasifikasi *Heat Exchanger*

2.1.4.1 Berdasarkan Prinsip Perpindahan Panas (Mode Perpindahan Panas)

1. Recuperators : Ini adalah jenis *heat exchanger* yang paling umum, di mana fluida panas dan dingin dipisahkan oleh dinding padat. Panas berpindah melalui konduksi melintasi dinding dan konveksi ke/dari fluida. Tidak ada pencampuran fluida. Contohnya adalah pada shell & tube dan plate HE.
2. Regenerator : pada *Heat exchanger* jenis ini, fluida panas dan dingin secara bergantian mengalir melalui atau melewati sebuah matriks padat yang menyimpan panas. Panas disimpan oleh matriks ketika dilalui fluida panas, kemudian dilepaskan ke fluida dingin. Contohnya adalah *rotary regenerator* (roda panas) atau *fixed-bed regenerator*.

2.1.4.2 Berdasarkan Konfigurasi Aliran Fluida

Konfigurasi aliran fluida mengacu pada bagaimana arah aliran fluida panas dan dingin mengalir didalam heat exchanger:

1. *Parallel flow*, aliran searah baik didalam dan diluar tube
2. Aliran berlawanan arah, Counter Flow
3. Aliran Silang (*Cross Flow*), aliran tegak lurus 1 fluida terhadap fluida lainnya.
4. Aliran *Multi-Pass*, yaitu kombinasi, di mana fluida dapat melewati *heat exchanger* beberapa kali untuk optimalisasi perpindahan panas

2.1.4.3 Berdasarkan Tipe Konstruksi

Hal ini adalah cara paling umum untuk mengklasifikasikan *heat exchanger* karena secara langsung mengacu pada desain fisik alatnya:

1. *Shell & tube Heat Exchanger* : alat penukar kalor ini banyak digunakan di dunia industri. Terdiri dari bundel yang ditempatkan di dalam cangkang (shell). Satu fluida

mengalir di dalam tabung, sementara fluida lainnya mengalir di luar tabung di dalam cangkang. Dapat memiliki satu atau lebih pass di sisi tabung dan sisi cangkang.

2. *Plate Heat Exchanger (PHE)* : Terdiri dari serangkaian pelat logam tipis yang diatur secara paralel dengan celah kecil di antaranya. Fluida mengalir di saluran yang dibentuk oleh pelat-pelat ini. Efisien, kompak, mudah dibersihkan, dan cocok untuk fluida bersih. Ada berbagai jenis seperti *gasketed plate heat exchanger*, *brazed plate heat exchanger*, dan *welded plate heat exchanger*.
3. *Double Pipe Heat Exchanger* : Bentuk paling sederhana, terdiri dari dua pipa konsentris (satu pipa di dalam pipa lain). Satu fluida mengalir di pipa bagian dalam, dan fluida lain mengalir di ruang annular antara kedua pipa. Cocok untuk laju alir rendah dan perpindahan panas kecil.
4. *Air-Cooled Heat Exchanger (Fin-Tube Heat Exchanger)* : Menggunakan udara sebagai salah satu fluida pendingin. Tabung biasanya memiliki sirip (*fin*) eksternal untuk meningkatkan luas permukaan kontak dengan udara. Umum digunakan sebagai kondensor atau pendingin di pabrik.
5. *Spiral Heat Exchanger* : Terdiri dari dua saluran spiral yang konsentris, tempat fluida mengalir. Desain ini cocok untuk fluida yang sangat kental atau fluida yang mengandung padatan karena sifat membersihkan dirinya sendiri dan laju alir yang turbulen.
6. *Lamella Heat Exchanger* : Mirip dengan *plate heat exchanger*, tetapi menggunakan pelat-pelat yang dilas dan bergelombang, memberikan fleksibilitas desain yang lebih besar untuk aplikasi tertentu.
7. *Plate-Fin Heat Exchanger*: Terdiri dari lapisan-lapisan pelat dan sirip yang disusun dan di-*brazed* bersama. Sangat kompak dan efisien, cocok untuk aplikasi gas-ke-gas atau gas-ke-cair di mana perbedaan suhu kecil dan ruang terbatas.
8. *Pillow Plate Heat Exchanger* : Terbuat dari dua lembar logam tipis yang dilas dan kemudian dipompa hingga mengembang, membentuk saluran aliran. Umumnya digunakan untuk pendinginan atau pemanasan tank, *jacketed vessels*, atau sebagai *falling film chiller*.

2.1.4.4 Berdasarkan Kontak Fluida

Berdasarkan kontak fluida, heat Exchanger dibagi menjadi 2:

1. Kontak Tidak Langsung : Fluida panas dan dingin tidak pernah bercampur. Panas berpindah melalui dinding pemisah. Ini adalah jenis yang paling umum (misalnya, *shell and tube, plate heat exchanger*).
2. Kontak Langsung : Fluida panas dan dingin bersentuhan langsung dan bertukar panas. Contohnya adalah menara pendingin (*cooling tower*) di mana air disemprotkan dan didinginkan oleh udara, atau *direct-contact condenser*.

2.1.5 Pengenalan Heat Exchanger type Shell and Tube

Heat exchanger shell and tube adalah salah satu jenis *heat exchanger* yang paling umum dan banyak digunakan di berbagai industri, seperti kimia, petrokimia, minyak dan gas, pembangkit listrik, serta HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning). Namanya sendiri menggambarkan konstruksinya: terdiri dari sebuah cangkang (*shell*) silinder besar yang di dalamnya berisi sejumlah besar tabung (*tube*).

1. Prinsip Kerja *Heat Exchanger type Shell and Tube*

Prinsip kerjanya sederhana sebagai berikut :

1. Satu jenis fluida (cair atau gas) mengalir di dalam tabung-tabung (*tube side*).
2. Fluida lainnya mengalir di luar tabung, di dalam cangkang (*shell side*).
3. Kedua fluida tidak bercampur, melainkan dipisahkan oleh dinding tabung.
4. Panas berpindah dari fluida bersuhu lebih tinggi ke fluida bersuhu lebih rendah melalui dinding tabung melalui mekanisme konduksi (melalui dinding) dan konveksi (antara fluida dengan dinding tabung).

2. Aliran Fluida *Shell & tube Heat Exchanger*

Aliran fluida di dalam *shell & tube heat Exchanger* bisa berbagai macam, seperti:

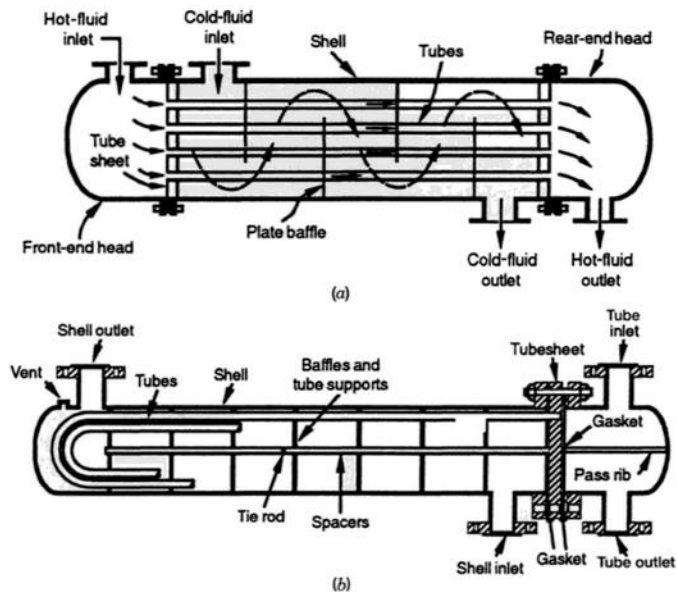
1. Aliran searah (*parallel flow*) : Kedua fluida masuk dari ujung yang sama dan mengalir dalam arah yang sama. 1 fluida mengalir di dalam tube dan fluida lain di luar tube.
2. Aliran berlawanan arah (*counter flow*) : Kedua fluida masuk dari ujung yang berlawanan dan mengalir berlawanan arah. Ini adalah konfigurasi yang paling efisien.

3. Aliran silang (cross flow) : merupakan tipe aliran yang arah aliran fluida nya salah satunya mengalir tegak lurus terhadap fluida lainnya.
4. Multi-pass : Baik di sisi tabung maupun sisi cangkang, fluida dapat dirancang untuk melewati *heat exchanger* beberapa kali untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas.

3. Komponen Utama *Heat Exchanger type Shell and Tube*

Beberapa bagian kunci dari *heat exchanger tipe shell & tubes* meliputi:

- a. *Shell* (Cangkang) : Merupakan bejana silinder luar yang menampung bundel tabung. Ini adalah saluran untuk fluida sisi cangkang.
- b. *Tube* (Tabung) : Merupakan elemen utama tempat perpindahan panas terjadi. Tabung-tabung ini biasanya terbuat dari logam konduktif seperti tembaga, baja tahan karat, atau titanium, dapat berupa tabung lurus atau berbentuk U (*U-tube*).
- c. *Tubesheet* : Plat tebal berlubang tempat tabung-tabung dilas atau dipasang. Tubesheet ini memisahkan fluida sisi tabung dari fluida sisi cangkang dan sekaligus menopang tabung. Ada dua tubesheet, satu di setiap ujung bundel tabung.
- d. *Baffle* (Sekat) : Plat-plat yang dipasang di dalam cangkang, tegak lurus terhadap tabung. Baffle berfungsi untuk:
 - o Mengarahkan aliran fluida di sisi cangkang sehingga mengalir melintasi tabung (bukan sejajar), yang meningkatkan turbulensi dan koefisien perpindahan panas.
 - o Menyokong tabung agar tidak melengkung atau bergetar akibat aliran fluida.
- e. *Head (Header)*: Bagian di kedua ujung *heat exchanger* yang mengarahkan fluida masuk dan keluar dari tabung. Ada *front head (fixed atau floating)* dan *rear head*.
- f. *Nozzle*: Saluran keluar masuk untuk fluida di sisi cangkang dan sisi tabung.



Gambar 2.2 Komponen Alat Penukar Kalor Shell & Tube

- (a) Shell and tube exchanger with one shell pass and one tube pass (BEM)
- (b) Shell and tube exchanger with one shell pass and two tube pass (BEU)

2.1.6 Mekanisme Pertukaran Panas

Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak balik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung (*direct contact*). Terdapat dua aliran penukar panas yaitu penukar panas dengan aliran searah (*co-current*) dan penukar panas dengan aliran berlawanan arah (*counter-current*).

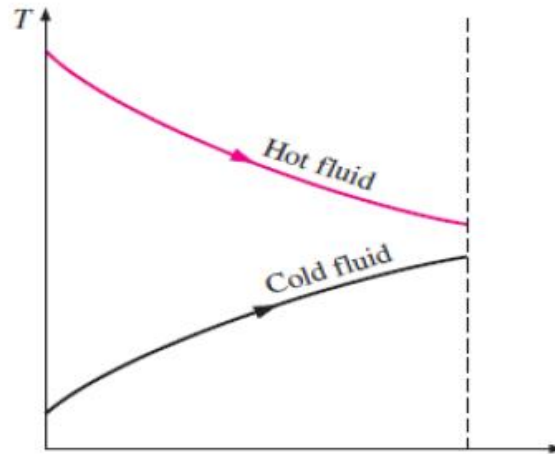
2.1.6.1 Aliran *Co-Current*

Penukar panas jenis ini , kedua fluida (dingin dan panas) masuk pada sisi penukar yang sama, mengalir dengan arah yang sama dan keluar pada sisi yang sama pula. Karakter penukar panas jenis ini, temperatur fluida dingin yang keluar dari alat penukar panas tidak dapat melebihi temperatur fluida panas yang keluar dari alat penukar panas, sehingga diperlukan media pendingin/pemanas yang banyak. Neraca panas yang terjadi :

$$m_c \cdot (T_{cb} - T_{ca}) = m_h \cdot (T_{ha} - T_{hb}) \dots\dots\dots(3)$$

Dengan asumsi nilai kapasitas panas spesifik (C_p) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas ke lingkungan serta keadaan *steady state*, maka kalor yang dipindahkan,

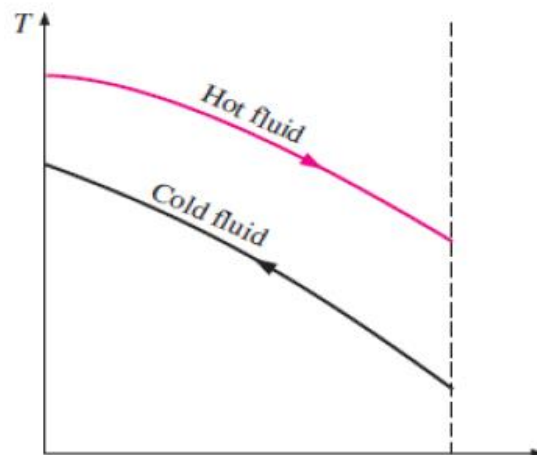
$$q = U \cdot A \Delta T_{LMTD}$$



Gambar 2.3 Profil Temperatur Aliran Co-Current (Cengel, 2003)

2.1.6.2 Aliran *Counter-Current*

Penukar panas jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk dan keluar pada sisi yang berlawanan. Temperatur fluida dingin yang keluar dari penukar panas lebih tinggi dibandingkan temperatur fluida panas yang keluar dari penukar kalor, sehingga dianggap lebih baik dari aliran searah.



Gambar 2.4 Profil Temperatur Aliran Counter Current (Cengel, 2003)

2.1.7 Perhitungan Laju Perpindahan Panas Heat Exchanger

Perhitungan Laju perpindahan panas yang terjadi pada alat penukar kalor dihitung dengan rumus :

$$Q = U \cdot A \cdot \text{LMTD} \dots\dots\dots(5)$$

di mana

- Q : Laju perpindahan panas (Watt)
- U : Koefisien perpindahan panas keseluruhan material (W/ m².K)
- A : Luas area perpindahan panas (M²)
- LMTD : Log Mean Temperatur Difference

1. Q (Laju Perpindahan Kalor) :

Q adalah sejumlah panas yang dipindahkan per satuan waktu, biasanya diukur dalam Watt (W) atau kJ/s.

2. Koefisien Perpindahan Panas Keseluruhan (U):

Ini adalah ukuran seberapa mudah panas dipindahkan melalui penukar panas. Nilai U tergantung pada material, geometri, dan kondisi aliran fluida.

3. Luas Area Perpindahan Panas (A):

adalah area permukaan di mana panas ditransfer antara dua fluida. Dalam konteks perpindahan panas, area ini dapat berupa plat atau berupa tube. Untuk tube perlu diperhitungkan berapa jumlah tube dan panjang tube serta diameternya kemudian diperhitungkan luasannya

perhitungan luas area pada tube :

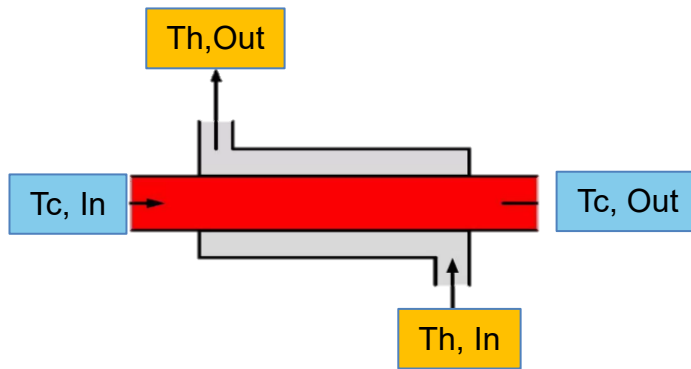
$$A = \pi \times D \times L \times n \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

- A = Luasan (m²)
- π = 3.14
- D = diameter (m)
- n = Jumlah tube

4. LMTD (Log Mean Temperature Difference)

LMTD adalah perbedaan rata-rata suhu fluida panas dan fluida dingin, yang digunakan untuk memperkirakan nilai dari laju perpindahan panasnya. Perhitungan LMTD menggunakan rumus yang berbeda tergantung pada konfigurasi penukar panas (paralel, kontra-aliran, dll.).



$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$$

Untuk aliran *counter flow*:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$$

Untuk aliran *parallel flow*:

$$\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,in}$$

$$\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,out}$$

Gambar 2.5 Ilustrasi Heat Exchanger

5. Correction Factor

Perhitungan LMTD untuk heat exchanger jenis shell and tube harus menggunakan factor koreksi yang didapatkan dengan menghitung rasio temperature P dan R . Kemudian mencari nilai yang sesuai menggunakan kurva factor koreksi.

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \dots\dots\dots(7)$$

$$R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(8)$$

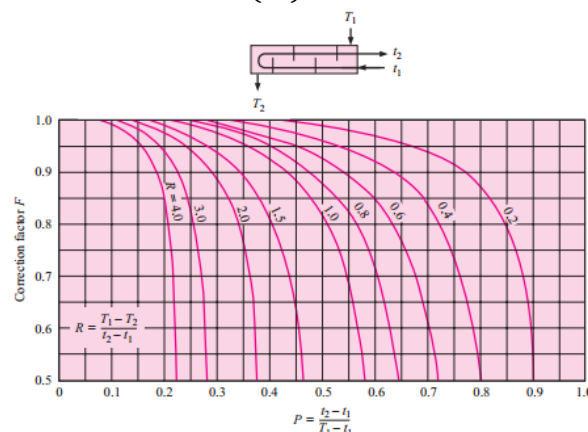
Dimana :

T_1 = Temperature inlet sisi shell (°C)

T_2 = Temperature outlet sisi shell (°C)

t_1 = Temperature inlet sisi tube (°C)

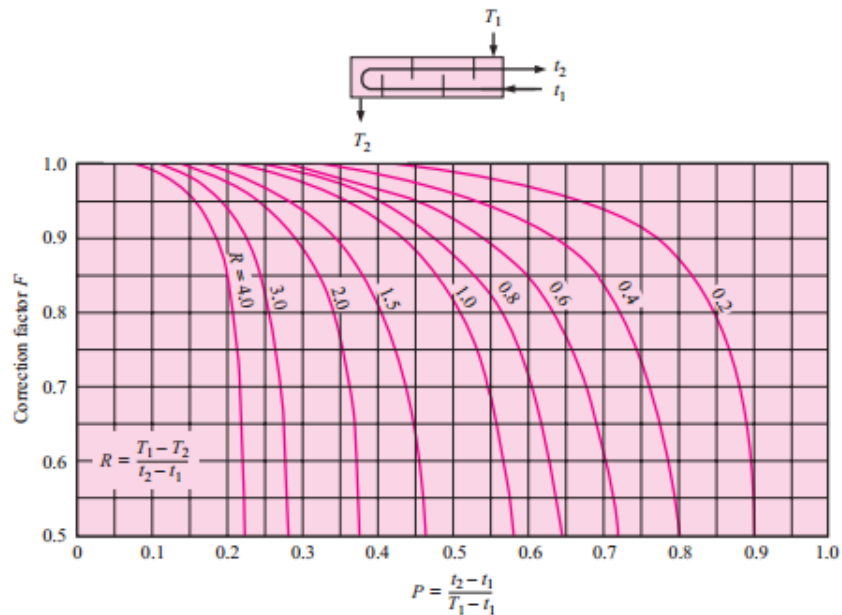
t_2 = Temperature outlet sisi tube (°C)



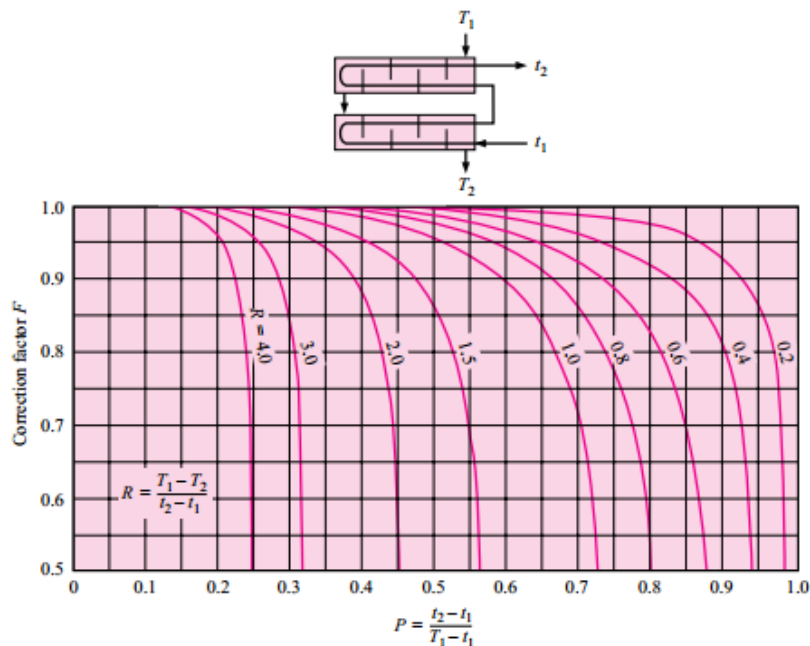
Gambar 2.6 Grafik faktor koreksi (F)

Jika heat exchanger yang digunakan selain dari tipe pipa ganda, maka perpindahan panas yang dihitung harus menggunakan factor koreksi yang di aplikasikan ke LMTD untuk heat exchanger tipe counter flow susunan pipa ganda dengan temperatur fluida panas dan dingin yang sama. Persamaan perpindahan panas kemudian mengambil bentuk berikut :

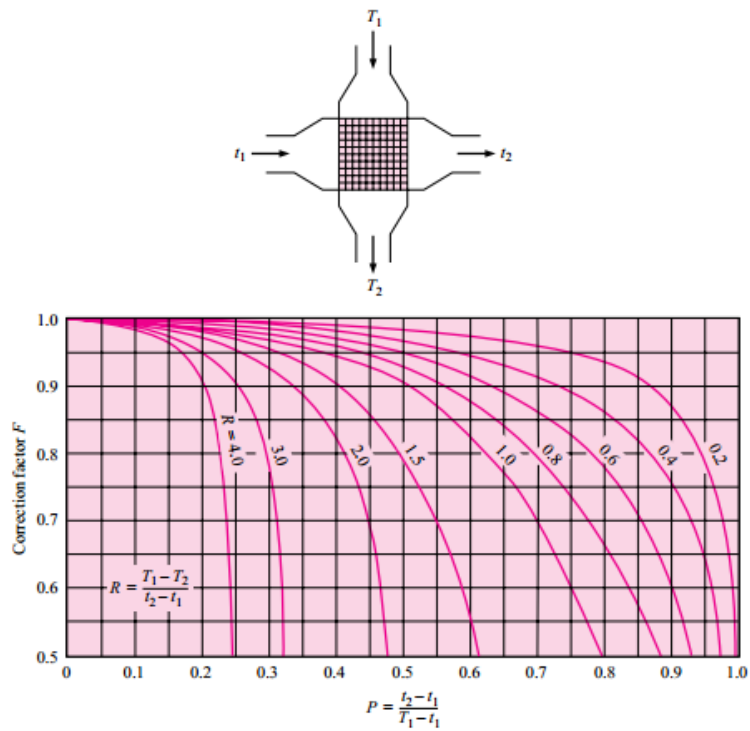
$$q = UAF\Delta T_m$$



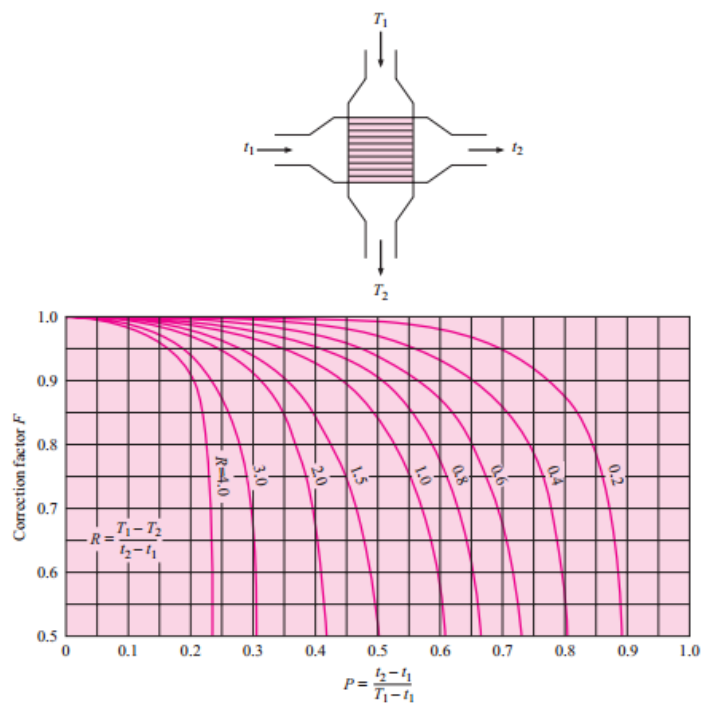
Gambar 2.7 Faktor koreksi untuk heat exchanger dengan satu pass cangkang dan dua, empat, atau beberapa pass pipa



Gambar 2.8 Faktor koreksi untuk heat exchanger dengan dua pass cangkang dan empat, delapan, atau beberapa pass pipa



Gambar 2.9 Faktor koreksi untuk heat exchanger pass tunggal aliran silang, dengan kedua fluida tidak bercampur



Gambar 2.10 Faktor koreksi untuk heat exchanger pass tunggal aliran silang, satu fluida bercampur, fluida yang lain tidak bercampur

2.1.8 Metode NTU (Number of Transfer Unit)

Pendekatan secara LMTD sangat berguna apabila temperature inlet dan outlet dari heat exchanger telah diketahui terlebih dahulu. Setelah LMTD dikalkulasikan, maka aliran perpindahan panas, permukaan perpindahan panas, atau koefisien perpindahan panas secara keseluruhan dapat ditentukan. Namun apabila temperature inlet atau outlet heat exchanger akan dihitung pada heat exchanger yang tidak diketahui sebelumnya, maka analisisnya seringkali melibatkan perhitungan berulang karena fungsi logaritmik pada LMTD. Pada kasus ini analisa akan lebih mudah dilakukan dengan menggunakan metode yang berdasarkan efektifitas dari heat exchanger dalam memindahkan sejumlah panas. Metode efektifitas NTU juga menawarkan berbagai keuntungan untuk menganalisa permasalahan yang mana melibatkan perbandingan antara berbagai macam tipe heat exchanger yang harus dilakukan untuk memilih tipe yang sangat cocok guna mendapatkan perpindahan panas yang mendetail.

$$Effectiveness = \epsilon = \frac{actual\ heat\ transfer}{maximum\ possible\ heat\ exchanger}$$

Perpindahan panas secara aktual dapat dihitung dengan mengkalkulasikan energy yang terbuang oleh fluida panas atau energy yang didapatkan oleh fluida dingin. *Heat exchanger* yang terdapat pada PLTA Koto Panjang menggunakan tipe aliran *counter flow*, sehingga persamaan yang digunakan adalah persamaan untuk counter flow :

$$q = m_h c_h (T_{h1} - T_{h2}) = m_c c_c (T_{c1} - T_{c2}) \dots \dots \dots (9)$$

Untuk menentukan perpindahan panas maksimum yang mungkin dapat terjadi pada *heat exchanger*, kita harus mengenali bahwa nilai maksimum hanya dapat dicapai apabila salah satu fluida melakukan perubahan temperatur yang sama dengan perbedaan temperature maksimum yang ada pada *heat exchanger*, yaitu perbedaan temperatur antara temperatur masuk untuk fluida panas dan dingin. Fluida yang mungkin dapat melakukan perubahan temperature maksimum ini adalah yang memiliki nilai *minimum* pada m_c karena kesetimbangan energi mensyaratkan bahwa energi yang diterima oleh salah satu fluida setara dengan yang diberikan oleh fluida lainnya. Oleh karena itu, perpindahan panas maksimum dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$q_{max} = (mc)_{min}(T_{h\ inlet} - T_{c\ inlet}) \dots \dots \dots (10)$$

Fluida yang memiliki nilai minimum dapat merupakan fluida panas atau dingin, tergantung pada laju alir massa dan panas spesifik fluida tersebut. Subskripsi pada symbol effectiveness menyimbolkan bahwa fluida memiliki nilai minimum pada mc . Untuk heat exchanger counterflow persamaannya adalah sebagai berikut :

$$\epsilon_h = \frac{m_h c_h (T_{h1} - T_{h2})}{m_h c_h (T_{h1} - T_{c2})} = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{h1} - T_{c2}} \dots\dots\dots(9)$$

$$\epsilon_c = \frac{m_c c_c (T_{c1} - T_{c2})}{m_c c_c (T_{h1} - T_{c2})} = \frac{T_{c1} - T_{c2}}{T_{h1} - T_{c2}} \dots\dots\dots(10)$$

Pada cara yang lebih umum maka effectifenes dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\epsilon = \frac{\Delta T(\text{fluida minimum})}{\text{perbedaan temperatur maksimum pada heat exchanger}}$$

Fluida minimum adalah fluida yang selalu mengalami perbedaan temperatur terbesar pada heat exchanger, dan perbedaan temperature maksimum pada heat exchanger selalu merupakan perbedaan pada temperature inlet pada fluida panas dan fluida dingin.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[(-UA/C_{min})(1 + C_{min}/C_{max})]}{1 + C_{min}/C_{max}} \dots\dots\dots(11)$$

Dimana $C = mc$ didefinisikan sebagai *capacity rate*

Persamaan *effectiveness* untuk tipe aliran berlawanan dapat ditulis sebagai berikut.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[(-UA/C_{min})(1 - C_{min}/C_{max})]}{1 - (C_{min}/C_{max}) \exp[(-UA/C_{min})(1 - C_{min}/C_{max})]} \dots\dots\dots(12)$$

Fluida minimum adalah fluida yang selalu mengalami perbedaan temperatur terbesar pada *heat exchanger*, dan perbedaan temperatur maksimum pada *heat exchanger* selalu merupakan perbedaan pada temperatur inlet pada fluida panas dan fluida dingin.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[(-UA/C_{min})(1 + C_{min}/C_{max})]}{1 + C_{min}/C_{max}} \dots\dots\dots(13)$$

Dimana $C = mc$ didefinisikan sebagai *capacity rate*

Persamaan effectiveness untuk tipe aliran berlawanan dapat ditulis sebagai berikut.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[(-UA/C_{min})(1 - C_{min}/C_{max})]}{1 - (C_{min}/C_{max}) \exp[(-UA/C_{min})(1 - C_{min}/C_{max})]} \dots\dots\dots(14)$$

Istilah pengelompokan UA/C_{min} disebut dengan *number of transfer units* (NTU).

Persamaan NTU dirangkum ke dalam rumus – rumus berikut secara keseluruhan.

Heat exchanger type	Effectiveness relation
1 Double pipe:	
Parallel-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + c)]}{1 + c}$
Counter-flow	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - c)]}{1 - c \exp[-NTU(1 - c)]}$ (for $c < 1$)
	$\epsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$ (for $c = 1$)
2 Shell-and-tube:	
One-shell pass 2, 4, ... tube passes	$\epsilon_1 = 2 \left\{ 1 + c + \sqrt{1 + c^2} \frac{1 + \exp[-NTU_1 \sqrt{1 + c^2}]}{1 - \exp[-NTU_1 \sqrt{1 + c^2}]} \right\}^{-1}$
n -shell passes $2n, 4n, \dots$ tube passes	$\epsilon_n = \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 c}{1 - \epsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \epsilon_1 c}{1 - \epsilon_1} \right)^n - c \right]^{-1}$
3 Cross-flow (single-pass)	
Both fluids unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ \frac{NTU^{0.22}}{c} [\exp(-c NTU^{0.78}) - 1] \right\}$
C_{max} mixed, C_{min} unmixed	$\epsilon = \frac{1}{c} (1 - \exp[-c(1 - \exp(-NTU))])$
C_{min} mixed, C_{max} unmixed	$\epsilon = 1 - \exp \left\{ -\frac{1}{c} [1 - \exp(-c NTU)] \right\}$
4 All heat exchangers with $c = 0$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$

Gambar 2.11 Rumus – rumus efektivitas (ϵ)

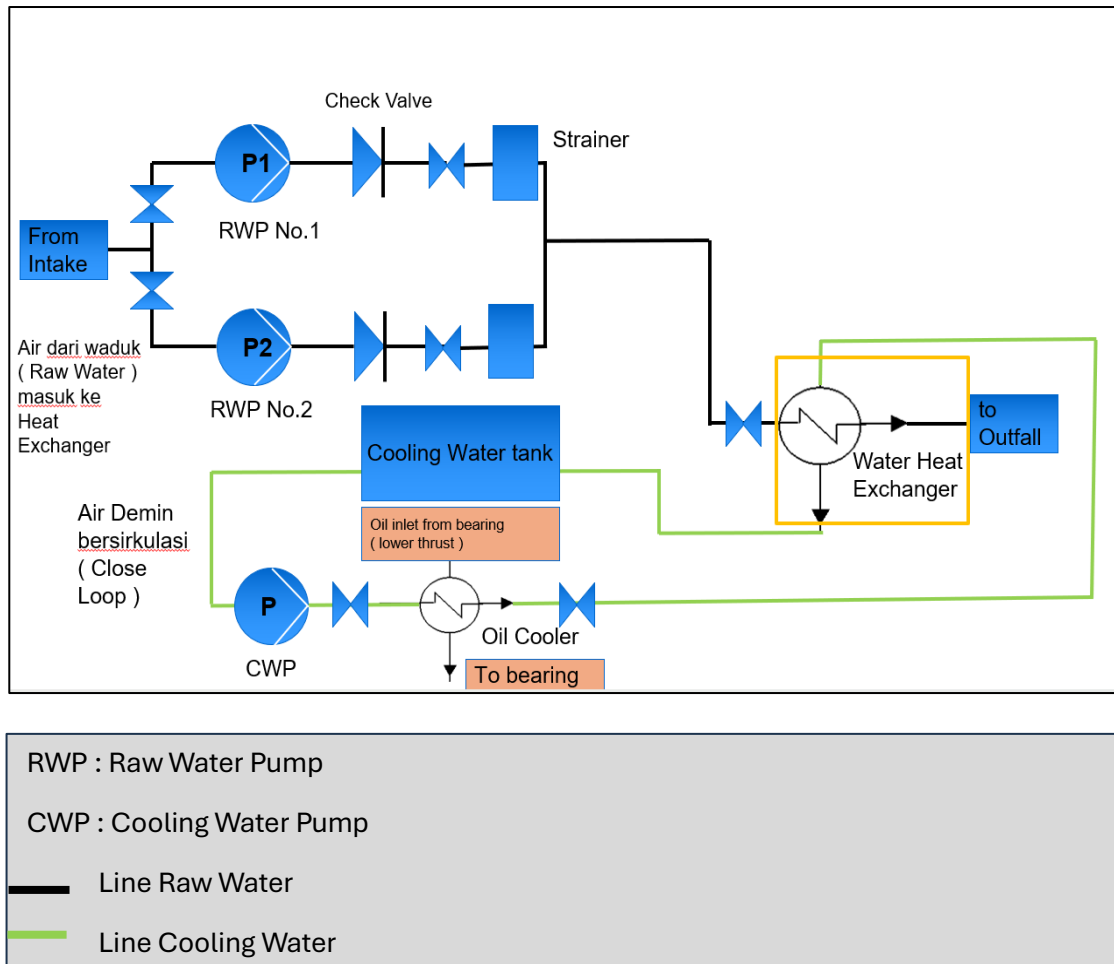
Untuk mendapatkan baik perpindahan panas yang tinggi dan efektivitas yang tinggi, harus dengan menambahkan nilai dari UA , baik dengan menambahkan ukuran (dan tentunya biaya) dari heat exchanger atau dengan memaksa aliran fluida yang mengalir pada heat exchanger dengan kecepatan yang lebih tinggi untuk meningkatkan koefisiensi perpindahan panas konveksi.

2.1.9 Sistem Water Heat Exchanger PLTA Kotopanjang

Water Heat Exchanger PLTA Kotopanjang merupakan salah satu peralatan yang menjadi bagian dari Oil dan Water Cooling system dimana Water Heat exchanger ini berperan sebagai alat pendingin dari air pendingin (*Cooling water*). Oil dan Water Cooling System merupakan mekanisme pendinginan bertingkat dengan mekanisme sebagai berikut :

1. Proses pendinginan dimulai dari *Water Heat Exchanger* dimana air waduk yang masuk kedalam intake sebagian diarahkan dengan piping system dan dipompakan menggunakan *Raw Water Pump* secara *open loop* menuju ke *water heat exchanger* melewati sisi dalam tube untuk mendinginkan air pendingin (*Cooling water*).
2. Air pendingin (*Cooling water*) bersirkulasi secara *close loop* dan masuk kedalam *water heat exchanger* di sisi shell di luar *tube*
3. *Cooling water* ini merupakan bagian dari mekanisme pendinginan oli pada peralatan *oil cooler* yang juga menggunakan mekanisme penukar kalor antara water dan oil yang berfungsi untuk mendinginkan oli yang melumasi bearing turbin dan generator
4. Ketika *cooling water* keluar dari *oil cooler*, air yang bertemperatur 35-36 °C ini kemudian bersirkulasi dan masuk ke dalam sistem *water heat exchanger* dan mengalami pertukaran kalor dengan raw water sehingga ketika keluar dari water heat exchanger temperatur cooling water menurun ke 32-33 °C dan bersirkulasi masuk ke dalam *cooling water tank* dan masuk kembali ke sistem *oil cooler* untuk mendinginkan Oli bearing. Sistem ini bersirkulasi secara close loop dengan dibantu pompa cooling water pump untuk proses yang kontinyu dalam mendukung operasional unit PLTA
5. Oli bearing akan bersirkulasi menuju *oil cooler* untuk memperoleh pendinginan dan secara kontinyu mendukung operasional unit.

Secara wiring, sistem water cooler PLTA kotopanjang dapat diskemakan seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.12 P & ID Cooling Water Sistem

Untuk dapat lebih mudah dalam memahami aliran fluida yang mengalir pada heat exchanger, maka secara teknis dijelaskan di dalam tabel berikut.

Tabel 2. 1 Fluida pada heat exchanger

Penamaan	Jenis Fluida	Peran	Temperature	Arah aliran	Debit
<i>Raw water</i>	Air	Fluida dingin (pendingin)	In : $\pm 26^{\circ}\text{C}$ Out: $\pm 28^{\circ}\text{C}$	Melalui sis dalam tube	56,3 L/s
<i>Cooling water</i>	Air	Fluida panas (yang didinginkan)	In: $\pm 35^{\circ}\text{C}$ Out: $\pm 32^{\circ}\text{C}$	Melalui shell	82.5 L/s

Untuk dapat melakukan perhitungan perpindahan panas dibutuhkan data berupa dimensi dari heat exchanger, jumlah tube, serta debit alira fluida pada heat exchanger. Berikut ini adalah spesifikasi teknis dari heat exchanger yang didapat langsung dari Operation and Maintenance Manual Cooling Water System.

Tabel 2.2 Spesifikasi teknis heat exchanger PLTA Kotopanjang

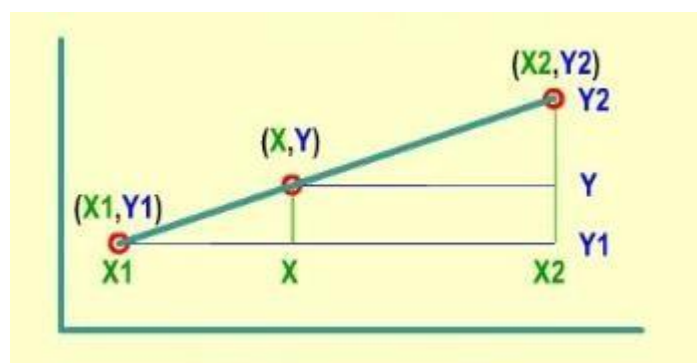
Manufacturer	Sterling	
Model	Shell and Tube	
Quantity	3	
Designation	CW HEX 01/02/03 161	
	Shell side	Tube Side
Design Pressure	6 Bar (Gauge)	6 Bar (Gauge)
Design Temperature	80°C	80°C
Test Pressure	9 Bar (Gauge)	9 Bar (Gauge)
Radiography	100% MP1	100% MP1
Stress Relief	None	None
Design Code	TEMA C : ASME VIII DIV 1	
Corrosion Allowance	1.6 mm	1.6 mm

Fluids	Fresh Water	River Water
Flow	82.5 L/s	183 L/s
Material		Stainless Steel T304
Dimension	OD : 559 mm Thickness : 9.92 mm L: 3048 mm	OD: 13 mm Thickness : 1 mm L: 3048 mm
Quantity	1 pcs	666 pcs

2.1.10 Proses Pengolahan Data dengan Metode Interpolasi

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan menggunakan data temperatur yang didapat dari *log sheet operator control room*. Data temperatur yang digunakan merupakan data temperatur rekapitulasi terbaru dan disini penulis menggunakan data temperature rata-rata heat exchanger unit 1

Data-data temperatur dijadikan panduan untuk mencari nilai dari suatu parameter / konstanta. Untuk memperoleh hasil nilai yang lebih mendekati maka digunakan persamaan interpolasi linear seperti berikut ini.



$$\frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)} = \frac{(Y - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$$

$$Y = Y_1 + \frac{(X - X_1)}{(X_2 - X_1)}(Y_2 - Y_1)$$