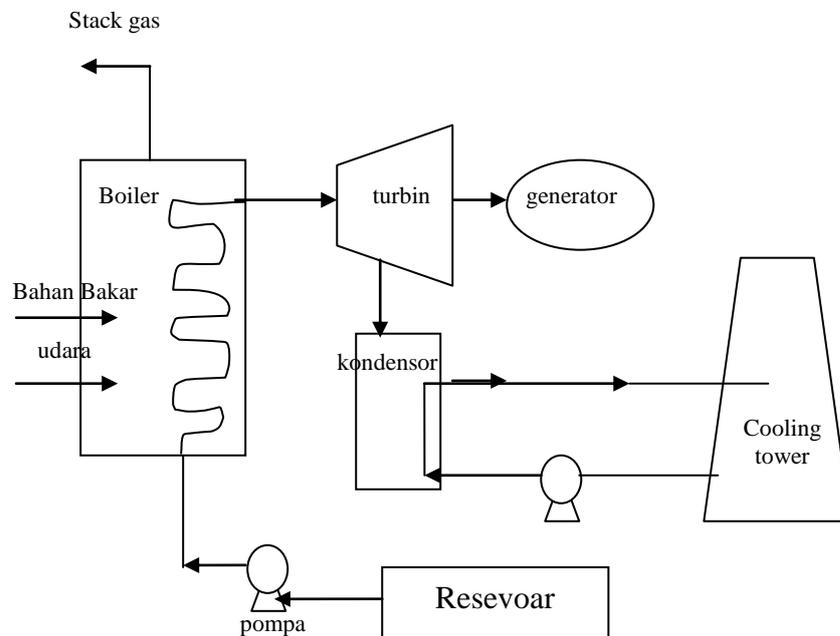


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap

Pembangkit Listrik Tenaga Uap secara terus menerus mengubah energi yang ada didalam bahan bakar fosil (batubara, minyak bumi, gas alam) atau bahan bakar fisi (uranium, thorium) dalam bentuk poros kerja dan akhirnya menjadi energi listrik. Kinerja fluida adalah air yang sewaktu-waktu berada pada fasa cair dan sewaktu-waktu pada fasa uap selama siklus beroperasi. Komponen-komponen pada pembangkit listrik tenaga uap tersebut dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Komponen-komponen Pembangkit Listrik Tenaga Uap

2.2 Siklus Rankine

Siklus Rankine adalah siklus termodinamika yang mengubah panas menjadi kerja. Panas yang disuplai secara eksternal pada aliran tertutup, yang biasanya menggunakan air sebagai fluida bergerak. Pada *steam boiler*, ini akan menjadi reversible tekanan konstan pada proses pemanasan air untuk menjadi uap air, lalu pada turbin proses ideal akan menjadi reversible ekspansi adiabatik dari uap, pada kondenser akan menjadi reversible tekanan konstan dari panas uap kondensasi yang masih *saturated liquid* dan pada proses ideal dari pompa akan

terjadi reversible kompresi adiabatik pada cairan akhir dengan mengetahui tekanannya. Ini adalah siklus reversible, yaitu keempat proses tersebut terjadi secara ideal yang biasa disebut Siklus Rankine.

Salah satu peralatan yang sangat penting di dalam suatu pembangkit tenaga listrik adalah Boiler (Steam Generator) atau yang biasanya disebut ketel uap. Alat ini merupakan alat penukar kalor, dimana energi panas yang dihasilkan dari pembakaran diubah menjadi energi potensial yang berupa uap. Uap yang mempunyai tekanan dan temperatur tinggi inilah yang nantinya digunakan sebagai media penggerak utama Turbin Uap. Energi panas diperoleh dengan jalan pembakaran bahan bakar di ruang bakar.

Sistem boiler terdiri dari: sistem air umpan, sistem *steam* dan sistem bahan bakar. Sistem air umpan menyediakan air untuk *boiler* secara otomatis sesuai dengan kebutuhan *steam*. Berbagai kran disediakan untuk keperluan perawatan dan perbaikan. Sistem steam mengumpulkan dan mengontrol produksi *steam* dalam boiler. *Steam* dialirkan melalui sistem pemipaan ke titik pengguna. Pada keseluruhan sistem, tekanan steam diatur menggunakan kran dan dipantau dengan alat pemantau tekanan. Sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang digunakan untuk menyediakan bahan bakar untuk menghasilkan panas yang dibutuhkan. Peralatan yang diperlukan pada sistem bahan bakar tergantung pada jenis bahan bakar yang digunakan pada sistem.

2.3 Proses Terbentuknya Uap

Bila diatas sekeping logam terdapat beberapa tetes air, dan kita perhatikan molekul-molekul air tersebut, temperatur air pada saat itu ialah T_0 °K atau °C. Molekul-molekul air tersebut bergerak bebas kesana-kemari dalam lingkungannya (lingkungan air) dengan kecepatan gerak V_0 meter/detik. Molekul-molekul tersebut dalam gerakannya belum dapat meninggalkan lingkungannya karena adanya gaya tarik-menarik antara molekul-molekul air itu sendiri. Apabila di bawah kepingan logam tersebut dipasang api, batang lilin, korek api dan sebagainya sedemikian sehingga api tersebut memanasi kepingan logam yang diatasnya terdapat beberapa tetes air, maka temperatur air tersebut akan naik menjadi T_1 °K atau °C, dan ternyata kecepatan gerak dari molekul-molekul air

tersebut akan bertambah menjadi V_1 meter/detik, namun belum mampu melepaskan diri dari lingkungannya.

Apabila kemudian api yang dipasang dibawah kepingan logam tersebut ditambah besarnya (menjadi dua batang lilin, dsb) maka temperatur air diatas kepingan logam tersebut akan bertambah menjadi T_2 °K atau °C, sedangkan kecepatan gerak dari molekul-molekul bertambah menjadi V_2 meter/detik, namun masih belum mampu melepaskan diri dari lingkungannya. Dan apabila api yang dipasang dibawah kepingan logam tersebut senantiasa ditambah besarnya, sedemikian hingga temperatur air diatas kepingan logam tersebut mencapai T_d °K atau °C, sedangkan kecepatan gerak molekul-molekul air tersebut telah mencapai V_d meter/detik, sehingga molekul-molekul air tersebut mampu melepaskan diri dari lingkungannya, dan mampu melepaskan diri dari gaya tarikmenarik antara molekul-molekul air tersebut. Molekul-molekul air yang melepaskan diri dari lingkungannya tersebut akan berubah menjadi molekul uap yang kecepatan geraknya melebihi kecepatan gerak molekul-molekul air yang semula. Proses yang demikian ini disebut “proses penguapan” atau “proses pembentukan uap”.

2.4 Jenis Boiler

2.4.1 Water-Tube Boiler

Pada *water tube boiler*, air umpan boiler mengalir melalui pipa-pipa masuk kedalam drum. Air yang tersirkulasi dipanaskan oleh gas pembakar membentuk steam pada daerah uap dalam drum. Boiler ini dipilih jika kebutuhan steam dan tekanan steam sangat tinggi seperti pada kasus boiler untuk pembangkit tenaga. *Water tube boiler* yang sangat modern dirancang dengan kapasitas steam antara 4.500 – 12.000 kg/jam, dengan tekanan sangat tinggi. Banyak *water tube boilers* yang dikonstruksi secara paket jika digunakan bahan bakar minyak bakar dan gas. Untuk *water tube* yang menggunakan bahan bakar padat, tidak umum dirancang secara paket.

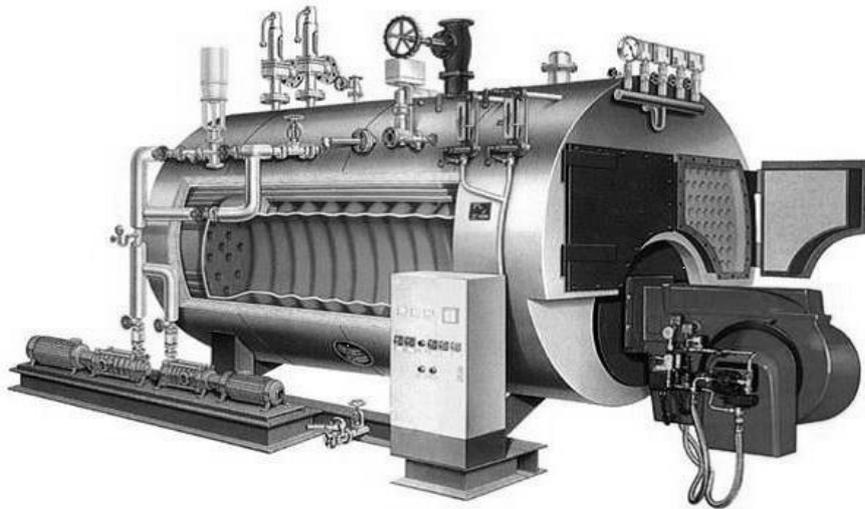
Karakteristik water tube boilers sebagai berikut:

- *Forced, induced* dan *balanced draft* membantu untuk meningkatkan efisiensi pembakaran

- Kurang toleran terhadap kualitas air yang dihasilkan dari *plant* pengolahan air.
- Memungkinkan untuk tingkat efisiensi panas yang lebih tinggi.

2.4.2 Fire-tube Boiler

Pada *fire tube boiler*, gas panas melewati pipa-pipa dan air umpan boiler ada didalam *shell* untuk dirubah menjadi steam. *Fire tube boilers* biasanya digunakan untuk kapasitas steam yang relative kecil dengan tekanan steam rendah sampai sedang. Sebagai pedoman, *fire tube boilers* kompetitif untuk kecepatan steam sampai 12.000 kg/jam dengan tekanan sampai 18 kg/cm². *Fire tube boilers* dapat menggunakan bahan bakar minyak bakar, gas atau bahan bakar padat dalam operasinya. Untuk alasan ekonomis, sebagian besar *fire tube boilers* dikonstruksi sebagai “paket” boiler (dirakit oleh pabrik) untuk semua bahan bakar.



Sumber: *Power Generation, Mc GrawHill*

Gambar 2. *Boiler Fire-Tube*

2.5 Heat Exchanger

Heat Exchanger (HE) adalah alat pemindah panas yang terkandung dalam suatu fluida satu ke fluida lain yang membutuhkan panas. Alat pemindah panas sangat dibutuhkan sekali dalam suatu proses produksi didalam suatu pabrik yang banyak menggunakan panas. Sehingga perlu didesain agar mendapatkan spesifikasi yang tepat didalam suatu perpindahan panas, namun ada juga alat

pemindah panas tersebut sudah tersedia sehingga perlu adanya evaluasi agar penggunaan bisa optimal.

Dengan demikian pada dasarnya terdapat dua macam perhitungan yang berkaitan dengan alat penukar panas, yaitu bersifat:

- Evaluasi analisis, yaitu perhitungan yang ditunjukkan pada HE yang sudah ada.
- Desain, yaitu perhitungan yang menghasilkan dimensi alat pemindah panas yang sesuai dengan kondisi proses dan operasi yang ditentukan,

Kriteria yang harus dipenuhi oleh alat pemindah panas, adalah:

- Mampu memindahkan panas sesuai dengan kebutuhan proses pada keadaan kotor (*bubly fouled*) yang dinyatakan dalam *dirty factor* (R_d) dihitung, seperti persamaan:

$$R_d = \frac{U_D - U_C}{U^C U^D} \dots\dots\dots(1)$$

$$U = \frac{h_{io} \times h_o}{h_{io} + h_o} \dots\dots\dots(2)$$

$$U_d = \frac{Q}{A \times \Delta t} \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

U_c = tahanan panas dalam keadaan bersih, (Btu/jam.ft².°F)

U_d = tahanan panas dalam keadaan kotor (Btu/jam.ft².°F)

R_d = dirt factor (jam.ft².°F/Btu)

h_{io} = koefisien perpindahan panas dalam pipa berdasarkan diameter luar dari pipa

h_o = koefisien perpindahan panas individual dalam tube

A = luas perpindahan panas

Δt = perbedaan temperatur yang sebenarnya

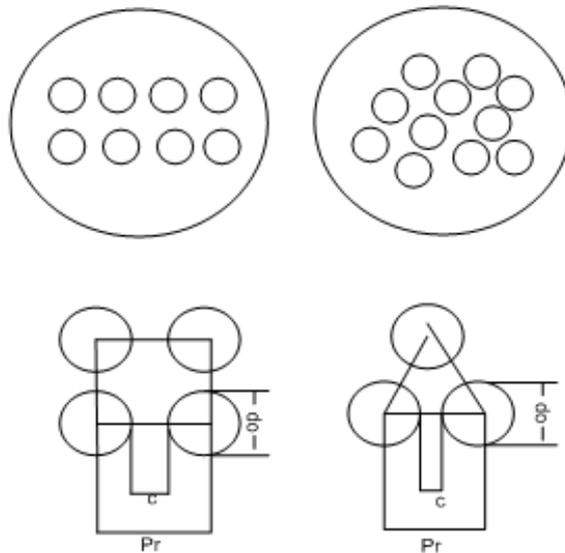
(Donald Q Kern.1950)

Ketetapan fouling faktor untuk air adalah antara 0,001 - 0,002 Btu/h.ft².°F

(www.gewater.com/handbook/cooling_water_systems/21/09/2012)

- Pressure drop (ΔP) untuk masing-masing aliran tidak melebihi batas yang ditetapkan atau tergantung dari sistem atau alat penggerak media yang digunakan. Kriteria pressure drop tersebut adalah:
 - a. Maksimal 10 psi untuk aliran liquida
 - b. Maksimal 1,5-2 psi untuk aliran gas atau uap.

Bagian dari Shell and Tube Exchanger adalah Shell yang merupakan tempat kumpulan pipa yang disusun dalam bentuk segiempat(square) atau dalam bentuk segitiga (triangle). Sedangkan tube adalah pipanya.



Gambar 3. Bentuk Pipa Susunan Segiempat dan Segitiga

2.6 Kondensor

Kondensor adalah suatu alat untuk mengkondensasi suatu uap. Kondensor sebagai alat penukar kalor berguna untuk membuang kalor dan mengubah wujud uap menjadi cair.

Faktor-faktor yang mempengaruhi kapasitas kondensor adalah:

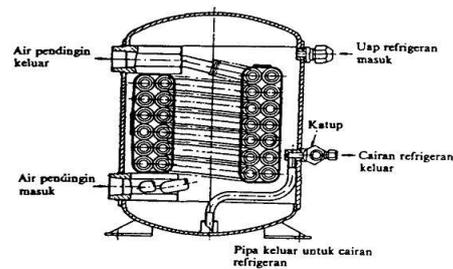
- a. Luas muka perpindahan panasnya meliputi diameter pipa kondensor, panjang pipa kondensor dan karakteristik pipa kondensor
- b. Aliran media pendinginnya secara konveksi alami atau aliran paksa
- c. Perbedaan suhu antara uap dengan udara luar
- d. Sifat dan karakteristik uap di dalam sistem

Kondensor ditempatkan di luar ruangan yang sedang didinginkan, agar dapat melepas keluar kepada zat yang mendinginkannya. Tekanan uap yang meninggalkan kondensor harus cukup tinggi untuk mengatasi gesekan pada pipa dan tahanan dari alat ekspansi, sebaliknya jika tekanan di dalam kondensor sangat rendah dapat menyebabkan uap tidak mampu mengalir melalui alat ekspansi. (repository.usu.ac.id)

Tipe-tipe kondensor adalah:

1. *Partial Condenser*

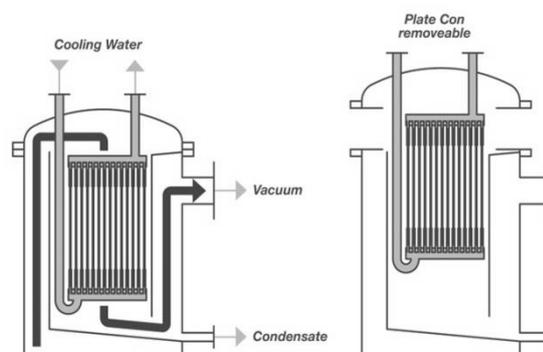
Condenser ini berfungsi hanya mengembunkan sebagian dari total uap yang dihasilkan (kondensat) dipakai sebagai refluks. *Condenser* ini biasanya dipasang dekat puncak kolom fraksinasi.



Gambar 4. *Partial Condenser*

2. *Overhead Condenser*

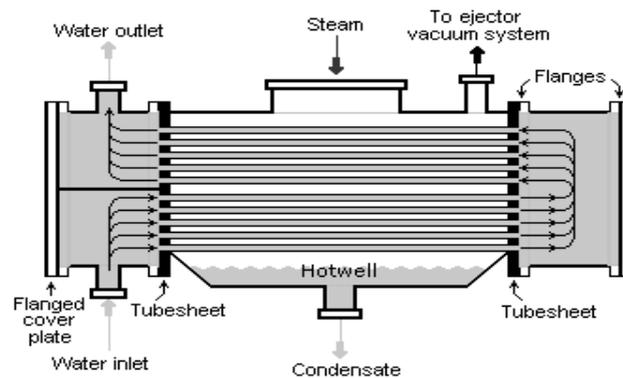
Condenser ini memerankan tiga hal pada saat yang bersamaan yakni menidnginkan uap, mengembunkan uap menjadi cairan, kemudian mendinginkan cairan tersebut.



Gambar 5. *Overhead Condenser*

3. *Surface Condenser*

Condenser ini berfungsi untuk mengkondensasi *steam*, kondensasi ini dijalankan dengan tekanan vakum dari 1 sampai 1,5 inHg *absolute*. Untuk membuat tekanan vakum digunakan injektor.



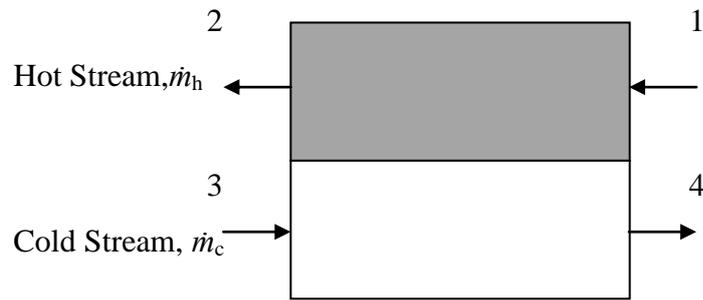
Gambar 6. *Surface Condenser*

2.7 Exergi

Exergi sebagai potensi kerja maksimum dalam bentuk materi atau energi ketika berinteraksi dengan lingkungannya. Potensi kerja ini diperoleh melalui proses reversible. Exergi dapat ditransfer diantara sistem dan dapat dihancurkan oleh proses irreversible didalam sistem. Exergi adalah kerja maksimum teoritis yang mampu diperoleh saat sistem tersebut berinteraksi dalam mencapai kesetimbangan (Sutini,2011).

Penukar kalor komponen utama dalam sistem dan merupakan komponen yang signifikan dalam kehilangan exergi. Alat penukar kalor tidak efisien dalam nilai exergi karena didesain untuk temperatur minimum atau didesain pada perbedaan temperatur yang maksimal (Kotas,1995).

Berikut ini merupakan rumus-rumus yang digunakan untuk menghitung exergi pada penukar panas :



Gambar 7. Kondensor

Sumber : (E jhon dkk, 1995)

Persamaan exergi sistem terbuka

$$0 = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_j}\right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{CV} + (\dot{m}_h e_{f1} + \dot{m}_c e_{f3}) - (\dot{m}_h e_{f2} + \dot{m}_c e_{f4}) - (\dot{E}_d) \dots \dots \dots (4)$$

Untuk sistem terbuka maka

$$\text{Harga :} \quad \sum \left(1 - \frac{T_0}{T_1}\right) \dot{Q}_1 = 0 \dots \dots \dots (5)$$

$$\dot{W}_{CV} = 0$$

$$\dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) = \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) + \dot{E}_d \dots \dots \dots (6)$$

$$\dot{E}_d = \dot{m}_h (e_{f1} - e_{f2}) - \dot{m}_c (e_{f4} - e_{f3}) \dots \dots \dots (7)$$

$$e_{f1} - e_{f2} = (h_1 - h_2) - T_0 (s_1 - s_2) \dots \dots \dots (8)$$

$$e_{f4} - e_{f3} = (h_4 - h_3) - T_0 (s_4 - s_3) \dots \dots \dots (9)$$

Dimana:

 \dot{m}_h = laju alir massa steam \dot{m}_c = laju alir massa fluida dingin $e_{f1} - e_{f2}$ = laju perpindahan exergi dari keadaan 1 ke keadaan 2 $e_{f4} - e_{f3}$ = laju perpindahan exergi dari keadaan 3 ke keadaan 4 \dot{E}_d = kehancuran exergi

h = entalphi

S = entropi

 T_0 = Temperatur *reference*

2.8 Faktor Pengotoran (*Fouling Factors*)

Faktor pengotoran ini sangat mempengaruhi perpindahan panas pada alat penukar kalor. Pengotoran pada bagian dalam dan bagian luar tube selalu terjadi selama peralatan beroperasi. Kondisi tersebut dapat terjadi atau timbulnya deposit pengotor pada permukaan tube akan menaikkan tahanan panasnya. Hal ini akan menurunkan koefisien perpindahan panas keseluruhan (U).

Beberapa faktor dapat menimbulkan pengotoran penukar kalor ialah:

- a. Temperatur fluida
- b. Temperatur dinding *tube*
- c. Material *tube* serta ketelitian pengerjaan
- d. Kecepatan aliran fluida
- e. *Natural fluids* dan deposit material
- f. Waktu atau lamanya beroperasi dari pembersihan terakhir

Tabel 1. Nilai Faktor Pengotoran (*fouling factor*)

<i>Fluid</i>	<i>Coefficient (W/m² °C)</i>
River Water	3000 - 12000
sea water	1000 - 3000
Cooling water (towers)	3000 - 6000
Towns water (soft)	3000 - 5000
Towns water (hard)	1000 - 2000
Steam Condensate	1500 - 5000
Steam (oil free)	4000 - 10000
Steam (oil traces)	2000 - 5000
Refrigerated brine	3000 - 5000
Flue gases	2000 - 5000

Sumber: *Process Heat Transfer, Kern, 1983*

2.9 Logarithmic Mean overall Temperature Difference (LMTD)

Sebelum menentukan luas permukaan panas alat penukar kalor (A), maka terlebih dahulu ditentukan nilai dari T_{lm} . Ini dihitung berdasarkan selisih temperatur dari fluida yang masuk dan keluar dari penukar kalor.

Selisih temperatur rata-rata logaritmik (*logarithmic mean overall temperature difference – LMTD*) dapat dihitung dengan formula berikut:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \dots \dots \dots (10)$$

Dimana:

LMTD = Selisih temperatur rata-rata logaritmik

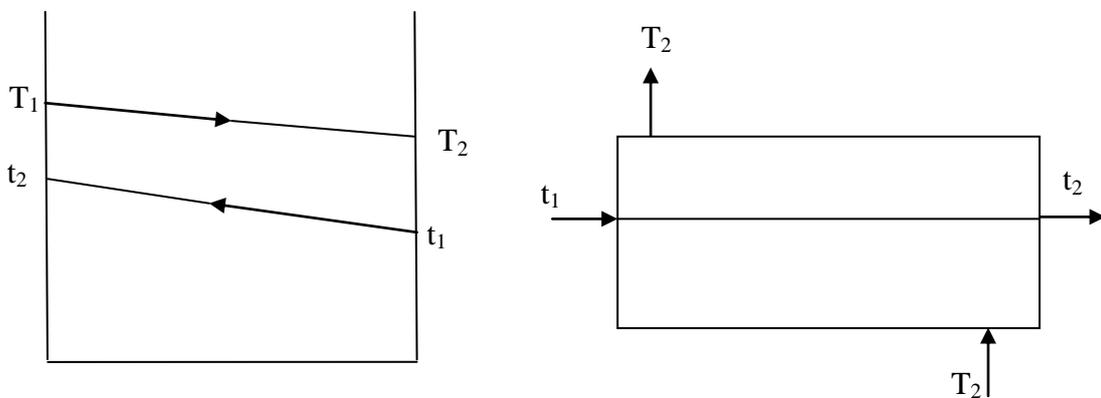
T₁ = Temperatur fluida masuk ke dalam *shell* (diluar *tube*)

T₂ = Temperatur fluida yang keluar dari *shell*

t₁ = Temperatur fluida yang masuk ke dalam *tube*

t₂ = Temperatur fluida yang keluar dari *tube*

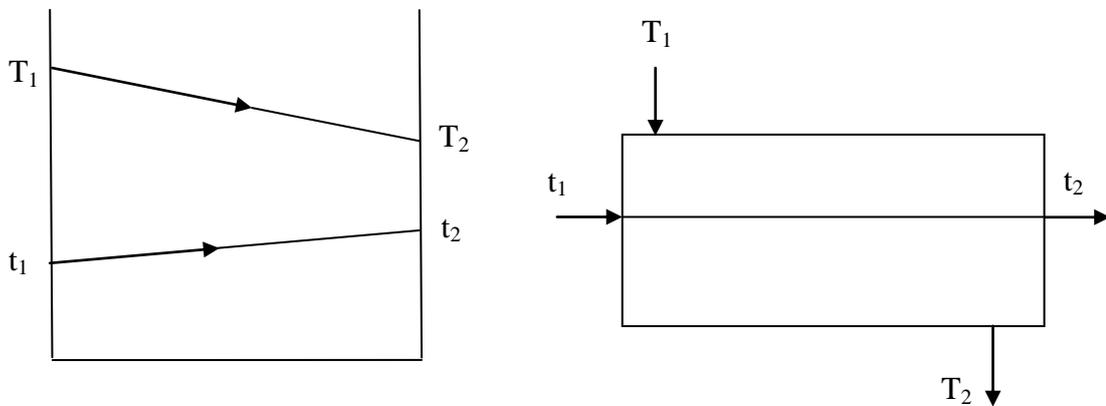
Formula di atas berlaku untuk alat penukar kalor dengan aliran fluida berlawanan



Gambar 8. LMTD untuk aliran berlawanan

Untuk aliran yang paralel arah aliran fluida berbeda, maka formula itu menjadi sebagai berikut:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - t_1)}} \dots \dots \dots (11)$$



Gambar 9. LMTD untuk paralel *flow*

Secara umum, formula itu ditulis sebagai berikut:

$$LMTD = \frac{T_{maks} - T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{maks}}{\Delta T_{min}}} \dots \dots \dots (12)$$

Dimana:

ΔT_{maks} = nilai maksimum ($T_1 - t_1$) atau ($T_1 - t_2$)

ΔT_{min} = nilai minimum ($T_2 - t_2$) atau ($T_2 - t_1$)

Didalam perencanaan alat penukar kalor harus dicari selisih temperatur rata-rata sebenarnya, yaitu dengan menggunakan faktor koreksi F_T . Besarnya selisih temperatur rata-rata sebenarnya adalah:

$$\Delta T_m = F_T \times LMTD$$

Dimana:

ΔT_m = Selisih temperatur rata-rata yang sebenarnya

LMTD = Selisih temperatur rata-rata logaritmik

F_T = Faktor koreksi didapat dari grafik koreksi

Faktor Koreksi ini merupakan fungsi dari:

1. Temperatur fluida di dalam dan di luar *tube*
2. Jumlah aliran dari *shell* dan *tube*

Grafiknya digambarkan sedemikian rupa dimana terdapat 3 besaran sekaligus yaitu:

1. Temperatur efisiensi alat penukar kalor (S) dimana $S = (t_2 - t_1)/(T_1 - t_1)$ pada sumbu mendatar
2. Parameter R merupakan perbandingan hasil perkalian aliran fluida dalam *shell* (m_s) dengan panas (C_{pt}), dapat ditulis sebagai berikut:

$$R = \frac{m_t \times C_{pt}}{m_s \times C_{ps}} = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \dots \dots \dots (13)$$

3. Faktor koreksi (F_T) yang digambarkan pada sumbu tegak

Penggunaan selisih temperatur rata-rata logaritmis untuk aliran berlawanan dan aliran searah sangat sesuai jika dipenuhi kondisi berikut:

1. Koefisien perpindahan panas keseluruhan (*overall heat transfer coefficient*) selalu tetap
2. Terjadi pencampuran (*mixing*) yang sempurna di dalam *shell* dan aliran dalam *tube*
3. Kapasitas aliran yang melintang cukup besar
4. Besarnya aliran dan juga panas jenis fluida tidak berubah
5. Entalpi fluida merupakan fungsi linear dari temperatur
6. Luas permukaan sama pada masing-masing *pass shell* dan *tube*.
7. Tidak terjadi kerugian panas alat penukar kalor terhadap sekitarnya.

(Kern, 1983)

2.10 Entalpi

Entalpi adalah istilah dalam termodinamika yang menyatakan jumlah energi dalam suatu sistem termodinamika. Entalpi terdiri dari energi dalam sistem, termasuk satu dari lima potensial termodinamikadan fungsi keadaan, juga volume dan tekanannya merupakan besaran ekstensif. Satuan SI dari entalpi adalah joule, namun digunakan juga satuan British Thermal Unit dan kalori.

Total entalpi (H) tidak bisa diukur langsung. Sama seperti pada mekanika klasik, hanya perubahannya yang dapat dinilai. Entalpi merupakan potensial termodinamika, maka untuk mengukur entalpi suatu sistem, kita harus menentukan titik *reference* terlebih dahulu, baru kita dapat mengukur perubahan entalpi ΔH . Perubahan ΔH bernilai positif untuk reaksi endotermis dan negatif untuk eksotermis.

Untuk proses dengan tekanan konstan, ΔH sama dengan perubahan energi dalam sistem kerja yang dilakukan sistem pada lingkungannya. Maka, perubahan entalpi pada kondisi ini adalah panas yang diserap atau dilepas melalui reaksi kimia atau perubahan panas eksternal.

Entalpi gas ideal, *solid* dan *liquid* tidak tergantung pada tekanan. Benda nyata pada temperatur dan tekanan ruang biasanya kurang lebih mengikuti sifat ini, sehingga dapat menyederhanakan perubahan entalpi. (Wikipedi.org)

2.11 Entropi

Entropi adalah salah satu besaran termodinamika yang mengukur energi dalam sistem per satuan temperatur yang tak dapat digunakan untuk melakukan usaha. Mungkin manifestasi yang paling umum dari entropi adalah (mengikuti hukum termodinamika), entropi dari sebuah sistem tertutup selalu naik dan pada kondisi transfer panas, energi panas berpindah dari komponen yang bersuhu lebih tinggi ke komponen yang bersuhu lebih rendah. Pada suatu sistem yang panasnya terisolasi, entropi hanya berjalan satu arah (bukan proses *reversible* atau bolak – balik). Entropi suatu sistem perlu diukur untuk menentukan bahwa energi tidak dapat dipakai untuk melakukan usaha pada proses-proses termodinamika. Proses-proses ini hanya bisa dilakukan oleh energi yang sudah diubah bentuknya, dan ketika energi diubah menjadi kerja atau usaha, maka secara teoritis mempunyai efisiensi maksimum tertentu. Selama kerja atau usaha tersebut, entropi akan terkumpul pada sistem, yang lalu terdisipasi dalam bentuk panas buangan.

Pada termodinamika, yang menyatakan konsep entropi didefinisikan pada hukum kedua termodinamika, yang menyatakan bahwa entropi dari sistem yang terisolasi selalu bertambah atau tetap konstan. Maka, entropi juga dapat menjadi ukuran kecendrungan suatu proses, apakah proses tersebut cenderung akan “terentropikan” atau akan berlangsung ke arah tertentu. Entropi juga menunjukkan bahwa energi panas selalu mengalir secara spontan dari daerah yang suhunya lebih tinggi ke daerah yang suhunya lebih rendah. (Wikipedia.org)

2.12 Persamaan Interpolasi Linier

Menentukan titik-titik antara 2 buah titik dengan menggunakan garis lurus. Persamaan garis lurus yang melalui 2 titik (x_1, y_1) dan (x_2, y_2) dapat dituliskan dengan rumus:

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \dots\dots\dots (14)$$

$$y = y_1 + \frac{x-x_1}{x_2-x_1} (y_2 - y_1) \dots\dots\dots (15)$$

(Buku Termodinamika 1, Pujiastuti, 2011)

2.13 Perpindahan Kalor

Secara alami perpindahan kalor terjadi akibat adanya perbedaan temperatur, dimana kalor bergerak dari suatu area yang memiliki temperatur lebih tinggi. Proses perpindahan kalor ini akan terus berlangsung hingga akhirnya kedua area yang memiliki perbedaan temperatur mengalami kesetimbangan temperatur. Perpindahan kalor melalui suatu bahan padat yang disebut peristiwa konduksi, menyangkut pertukaran energi pada tingkat molekuler. Sebaliknya, radiasi adalah proses yang membawa energi dengan jalan pelompatan foton dari suatu permukaan yang lain. Radiasi dapat menyebrangi ruang vakum dan tidak bergantung pada media perantara untuk menghubungkan dua permukaan. Perpindahan kalor konveksi tergantung pada konduksi antara permukaan benda padat dengan fluida terdekat yang bergerak. Jadi masing-masing mekanisme perpindahan kalor berbeda satu sama lainnya, akan tetapi semuanya memiliki karakteristik umum karena masing-masing tergantung pada temperatur dan dimensi benda yang ditinjau. (Holman, 1991)

2.13.1 Konduksi

Konduksi adalah perpindahan kalor secara molekuler suatu material tanpa diikuti perpindahan material secara menyentuh. Contoh sederhana dari peristiwa konduksi adalah apabila suatu batang logam dipanaskan pada salah satu ujungnya, maka panas tersebut lama kelamaan akan dapat dirasakan pada ujung yang lainnya. Kepadatan aliran (flux) energi perpindahan kalor secara konduksi di

sepanjang sebuah batangan padat, sebanding dengan temperatur dan luas penampang, serta berbanding terbalik dengan panjangnya.

$$q = -k \cdot A \frac{\Delta T}{L} \dots \dots \dots (16)$$

Dengan: k = konduktivitas termal (W/m.K)
 A = luas penampang (m²)
 ΔT = beda temperatur (K)
 L = panjang (m)

Nilai minus (-) pada persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah menuju area yang memiliki temperatur lebih rendah. Konduktivitas termal adalah suatu karakteristik yang memiliki bilai berbeda pada tiap material dan perbandingan antara konduktivitas termal dengan panjang disebut dengan hantaran (konduktansi). Daya hantar (konduktivitas) termal dan laju perpindahan kalor konduktif dipengaruhi oleh struktur molekul material. Material logam dapat memindahkan energi lebih cepat bila dibandingkan dengan material non logam, karena material logam memiliki susunan molekul yang lebih rapi dan rapat sedangkan pada material non logam susunannya acak dan jarang. (Holman, 1991)

2.13.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan kalor melalui gerakan massa dari fluida seperti air atau udara. Hal ini terjadi karena adanya perbedaan temperatur diantara permukaan dengan fluida yang bergerak. Fluida yang dipanaskan bergerak menjauhi sumber panas menuju area yang memiliki temperatur lebih rendah dengan membawa energi. Contoh dari peristiwa ini adalah pada saat kita memasak air, dimana air yang berada dibagian bawah akan bergerak menjauhi sumber panasnya.

$$q = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \dots \dots \dots (17)$$

Dengan: h = koefisien konveksi (W/m².K)
 A = luas penampang (m²)
 T_s = temperatur permukaan (K)

T_f = temperatur fluida (K)

Perpindahan kalor secara konveksi dapat dibedakan menjadi dua macam, yaitu:

- Konveksi bebas (*free convection*), dimana aliran terjadi akibat dari gaya apung yang timbul dari perbedaan densitas fluida karena variasi temperatur dalam fluida.
- Konveksi paksa (*forced convection*), dimana aliran terjadi akibat adanya kerja dari luar seperti kipas, pompa ataupun pergerakan angin. (Holman, 1991)

2.13.3 Radiasi

Perpindahan energi secara radiasi berlangsung jika foton-foton dipancarkan dari suatu permukaan ke permukaan lain. Pada saat mencapai permukaan lain foton yang diradiasikan juga diserap, dipantulkan atau diteruskan melalui permukaan. Energi yang diradiasikan dari suatu permukaan ditentukan dalam bentuk daya pancar (*emissive power*), yang secara termodinamika dapat dibuktikan bahwa daya pancar tersebut sebanding dengan pangkat empat suhu absolutnya. Untuk sebuah radiator ideal biasanya berupa benda hitam dengan daya pancar:

$$E_B = \sigma T^4 \dots\dots\dots(18)$$

Dengan: E_B = daya pancar ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)
 σ = tetapan Stefan-Boltzman = $5,669 \times 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$)
 T = temperatur absolut (K)

(Holman, 1991)

2.14 Perpindahan Kalor ke Fluida dengan Disertai Perubahan Fase

Proses perpindahan kalor yang disertai oleh perubahan fase lebih rumit dari pertukaran kalor sederhana antara dua fluida. Perubahan fase mencakup penambahan atau pengurangan energi termal dalam jumlah yang agak banyak, pada suhu tetap atau hampir tetap. Laju perubahan fase itu mungkin ditentukan oleh laju perpindahan kalor, tetapi biasanya ditentukan oleh laju pembentukan

inti (nukleasi) gelembung, tetes, atau kristal serta oleh perilaku fase yang baru terbentuk. (Cabe, 1982)

2.14.1 Perpindahan Kalor dari Uap yang Mengembun

Uap kondensasi mungkin terdiri dari satu zat saja, mungkin berupa campuran zat mampu-kondensasi (*condensable*) dan zat tak mampu-kondensasi (*non-condensable*), atau mungkin pula campuran dua zat mampu-kondensasi atau lebih. Rugi-rugi gesekan di dalam kondensor biasanya cukup kecil, sehingga kondensasi itu dapat dikatakan merupakan proses tekanan-tetap. Suhu kondensasi satu zat murni merupakan proses isothermal. Demikian pula, kondensatnya merupakan zat cair murni. Uap campuran, yang mengkondensasi pada tekanan tetap, kondensasinya berlangsung dalam suatu jangkauan kisaran suhu, dan menghasilkan kondensat yang komposisinya variabel (berubah-ubah), hingga sampai seluruh uap itu mengembun, barulah komposisinya sama dengan komposisi awal uap sebelum kondensasi. (Cabe, 1982)