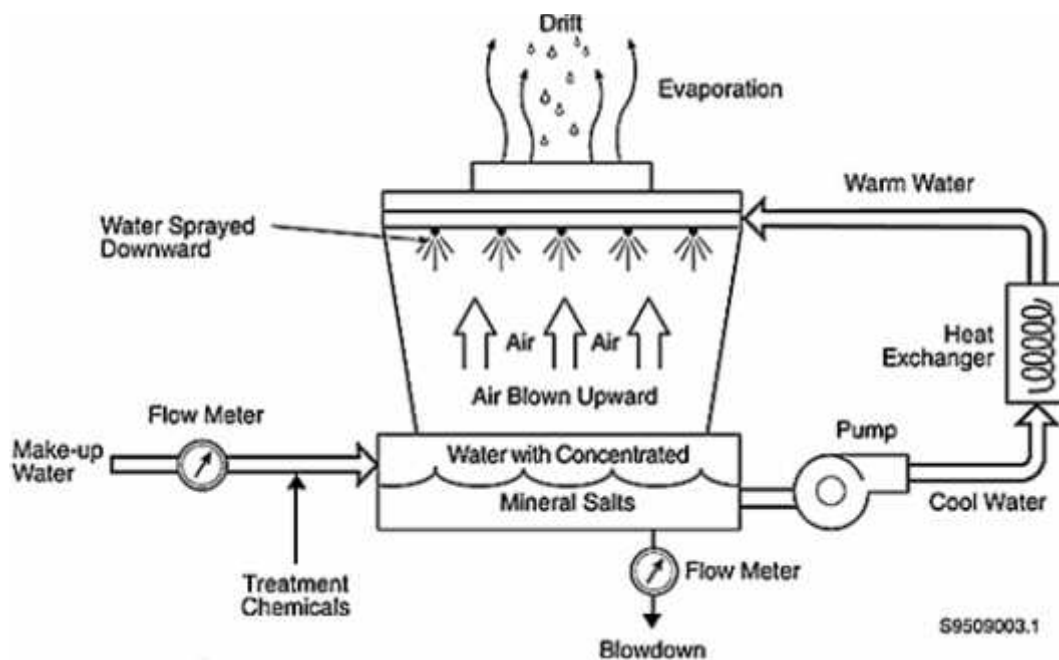


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Prinsip Kerja *Cooling Tower*

Cooling tower adalah suatu sistem refrigerasi yang melepaskan kalor ke udara. *cooling tower* bekerja dengan cara mengontakkan air dengan udara dan menguapkan sebagian air tersebut. Luas permukaan air yang besar dibentuk untuk menyemprotkan air lewat *nozel* atau memercikan air kebawah dari suatu bagian ke bagian lainnya. Bagian-bagian atau bahan – bahan pengisi biasanya terbuat dari kayu tetapi bisa juga dibuat dari plastik atau keramik.



Gambar 2.1. Diagram Skematika *Cooling Tower*.

Prestasi sebuah *cooling tower* basah tergantung dari temperatur bola basah dari udara yang masuk. Prestasi dari *cooling tower* biasanya ditunjukkan dalam

hubungan *Range* dan *Approach*. *Range* adalah perbedaan temperatur antara temperatur air yang masuk dan temperatur air yang keluar dari menara pendingin. Sedangkan *Approach* adalah perbedaan temperatur antara temperatur air yang keluar dari *cooling tower* dan temperatur bola basah udara yang masuk *cooling tower*.

Fungsi *Cooling Tower*

Cooling tower sangat dibutuhkan oleh industri sebab *cooling tower* merupakan bagian dari utilitas yang banyak digunakan. Dimana *cooling tower* memproses air yang panas menjadi air dingin yang digunakan kembali dan bisa dirotasikan. *Cooling tower* juga salah satu alat yang berfungsi mengolah air untuk mengatasi masalah polusi lingkungan.

Macam – Macam *Cooling Tower*

- a. Berdasarkan arah aliran udara masuk
 - *Cross flow*
 - *Counter current flow*
- b. Berdasarkan cara pemakaian alat bantu seperti fan atau blower
 - *Induced draft* (alat bantu berada dibagian puncak tower)
 - *Force draft* (alat bantu berada dibagian bawah tower)
- c. Berdasarkan kondisi aliran udara bebas tanpa alat pembantu
 - *Atmosphere* (udara pada kondisi *atmospheric* mengalir bebas tanpa memakai penutup tower).
 - *Natural draft* (udara mengalir dalam udara pendinginan dari tower namun kondisi udara belum tentu *atmospheric*).

Komponen *Cooling Tower*

Komponen dasar sebuah menara pendingin meliputi rangka dan wadah, bahan pengisi, kolam air dingin, eliminator aliran, saluran masuk udara, *louvers*, nosel dan *fan*. Berikut ini adalah penjelasan mengenai komponen-komponen menara pendingin:

2.4.1. Rangka dan Wadah

Hampir semua menara memiliki rangka berstruktur yang menunjang tutup luar (wadah/*casing*), motor, *fan*, dan komponen lainnya. Dengan rancangan yang lebih kecil, seperti unit *fiber glass*, wadahnya dapat menjadi rangka. Menara yang terbuat dari kayu masih tersedia, namun beberapa komponen dibuat dari bahan yang berbeda, seperti wadah *casing fiber glass* disekitar rangka kayu, saluran masuk udara *louvers* dari *fiber glass*, bahan pengisi dari plastik dan kolam air dingin dari baja. Banyak menara (wadah dan kolam) nya terbuat dari baja yang digalvanis atau, pada atmosfer yang korosif, menara dan/atau dasarnya dibuat dari *stainless steel*. Menara yang lebih besar kadangkala terbuat dari beton. *Fiber glass* juga banyak digunakan untuk wadah dan kolam menara pendingin, sebab dapat memperpanjang umur menara pendingin dan memberi perlindungan terhadap bahan kimia yang berbahaya.

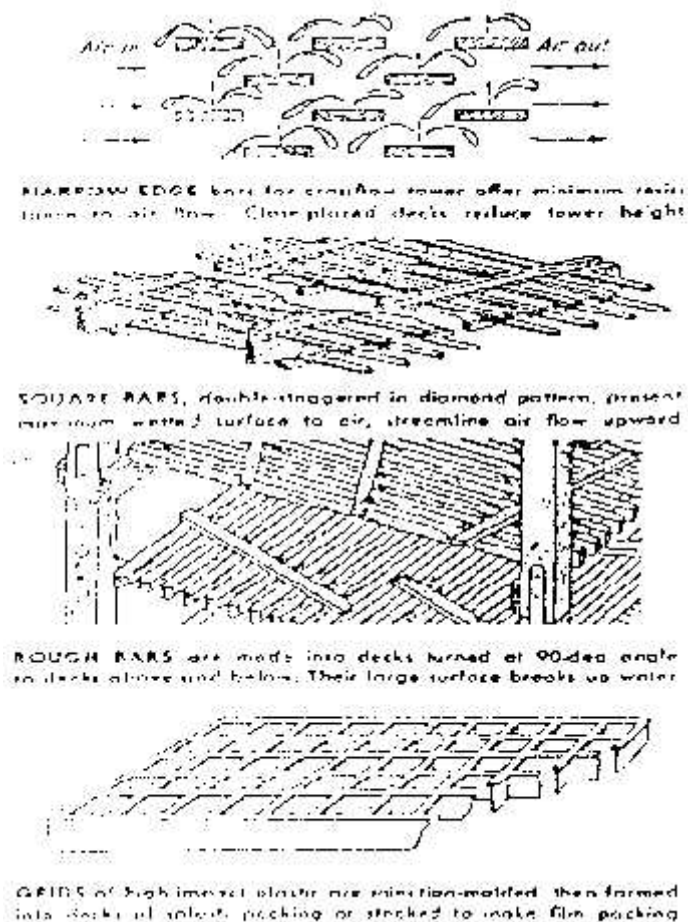
2.4.2. Bahan Pengisi

Biasanya menara pendingin menggunakan bahan pengisi untuk memfasilitasi perpindahan panas dengan memaksimalkan kontak udara

dan air. *Fill* adalah jantungnya menara pendingin. *Fill* berfungsi sebagai media kontak air dan udara sehingga terjadi perpindahan kalor (panas), dan dapat menghambat laju aliran air.

Pada dasarnya ada dua tipe *fill*, yaitu :

a. Jenis Percik (*Splash*)

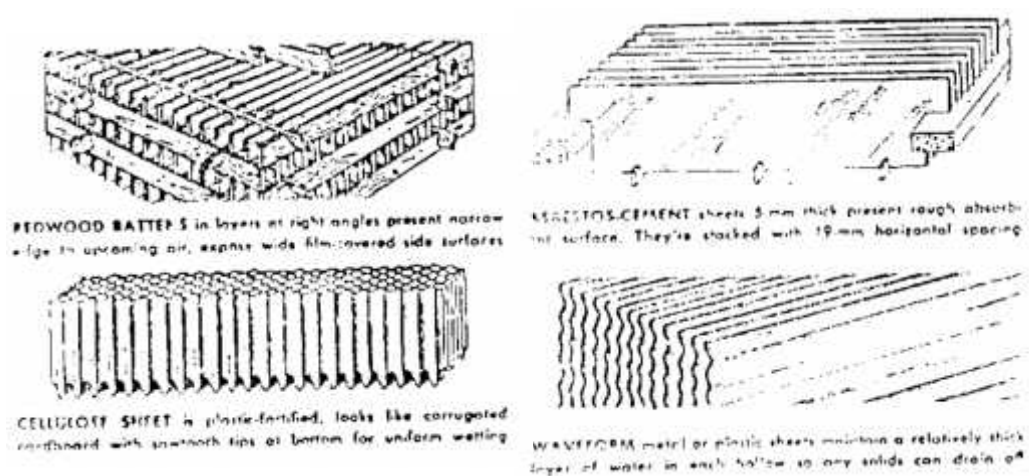


Gambar 2.2. Jenis Fill Percik (*Splash*).

Bahan pengisi berbentuk percikan/*Splash fill*: dibuat dengan palang horizontal sehingga air membelah dan menetes dari bagian *fill* paling atas ke bagian bawahnya secara terus menerus pecah menjadi tetesan yang lebih kecil, sambil membasahi permukaan bahan pengisi. Bentuk

palangnya berbeda-beda seperti *narrow edge*, palang bujur sangkar (*square bars*), *Rough bars*, kisi-kisi (*grids*), *fill* ini terbuat dari bahan yang berbeda-beda seperti kayu, aluminium, polysterine atau polyteline. *Fillsplash* adalah media kontak air dan udara sehingga terjadi perpindahan kalor (panas).

b. Jenis Film (*Non Splash*)



Gambar 2.3. Jenis Fill Film (*Non Splash*).

Bahan pengisi berbentuk film: terdiri dari permukaan plastik tipis dengan jarak yang berdekatan dimana di atasnya terdapat semprotan air, membentuk lapisan film yang tipis dan melakukan kontak dengan udara. Permukaannya dapat berbentuk datar, bergelombang, berlekuk, atau pola lainnya. Jenis bahan pengisi film lebih efisien dan memberi perpindahan panas yang sama dalam volume yang lebih kecil daripada bahan pengisi jenis *splash*. *Fill* Film terbuat dari bahan yang berbeda-beda seperti kayu, *cellulosesheets*, *asbestoscement sheets*, dan *waveform* metal atau plastik.

2.4.3. Kolam Air Dingin

Kolam air dingin terletak pada atau dekat bagian bawah menara, dan menerima air dingin yang mengalir turun melalui menara dan bahan pengisi. Kolam biasanya memiliki sebuah lubang atau titik terendah untuk pengeluaran air dingin. Dalam beberapa desain, kolam air dingin berada dibagian bawah seluruh bahan pengisi. Pada beberapa desain aliran yang berlawanan arah pada *forced draft*, air di bagian bawah bahan pengisi disalurkan ke bak yang berfungsi sebagai kolam air dingin.

2.4.4. Saluran Udara Masuk

Saluran udara masuk merupakan titik masuk bagi udara menuju menara. Saluran masuk bisa berada pada seluruh sisi menara (desain aliran melintang) atau berada dibagian bawah menara (desain aliran berlawanan arah).

2.4.5. Draft Fan

Draftfan berfungsi untuk mengirim aliran udara dari/menju menara pendingin untuk melakukan perpindahan kalor dengan air yang dilewati. *Fan* aksial (jenis baling-baling) dan sentrifugal keduanya sering digunakan dalam menara pendingin. Umumnya *fan* dengan baling – baling/*propeller* digunakan pada menara *induceddraft* dan baik *fanpropeller* dan sentrifugal dua – duanya ditemukan dalam menara *forceddraft*. Tergantung pada ukurannya, jenis *fanpropeller* yang digunakan sudah dipasang tetap atau dengan dapat dirubah-rubah/diatur. Sebuah *fan* dengan baling – baling yang dapat diatur tidak secara otomatis dapat digunakan diatas *range* yang cukup

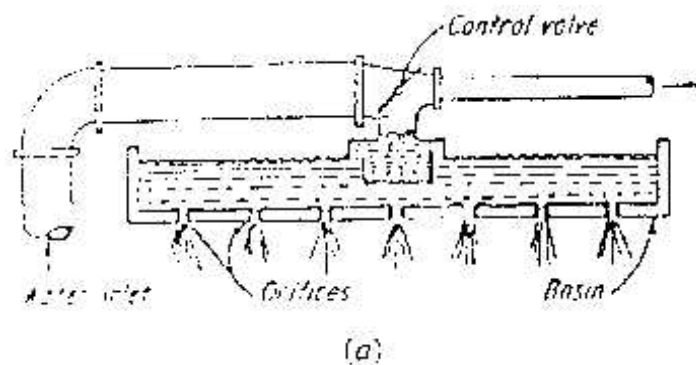
luas sebab *fan* dapat disesuaikan untuk mengirim aliran udara yang dikehendaki pada pemakaian tenaga terendah. Baling – baling yang dapat diatur secara otomatis dapat beragam aliran udaranya dalam rangka merespon perubahan kondisi beban.

Bahan yang biasa digunakan untuk *fan* adalah alumunium, *fiberglass* dan baja yang digalvanis celup panas. Baling – baling *fan* terbuat dari baja galvanis, alumunium, plastik yang diperkuat oleh *fiberglass* cetak.

2.4.6. Nosel

Nosel berfungsi mendistribusikan air untuk membasahi bahan pengisi. Distribusi air yang seragam pada puncak bahan pengisi adalah penting untuk mendapatkan pembasahan yang benar dari seluruh permukaan bahan pengisi. Nosel dapat dipasang dan menyemprot dengan pola bundar atau segi empat, atau dapat menjadi bagian dari rakitan yang berputar seperti pada menara dengan beberapa potongan lintang yang memutar. Bahan nosel terbuat dari PVC, kuningan, dan polipropilen. Ada beberapa tipe dari system distribusi air antara lain:

a. Distribusi Gravitasi

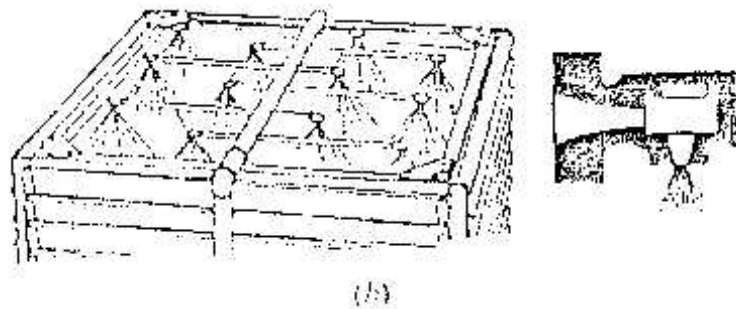


Gambar 2.4. Sistem Distribusi Gravitasi.

Distribusi gravitasi sebagian besar digunakan pada menara pendingin aliran silang, terdiri dari suatu bejana dimana air panas mengalir ke dalam bejana tersebut dan dengan gaya gravitasi air akan mengalir melalui lubang – lubang pada bejana sehingga air jatuh ke *fill* yang dibawahnya.

b. *Spray*Distribusi

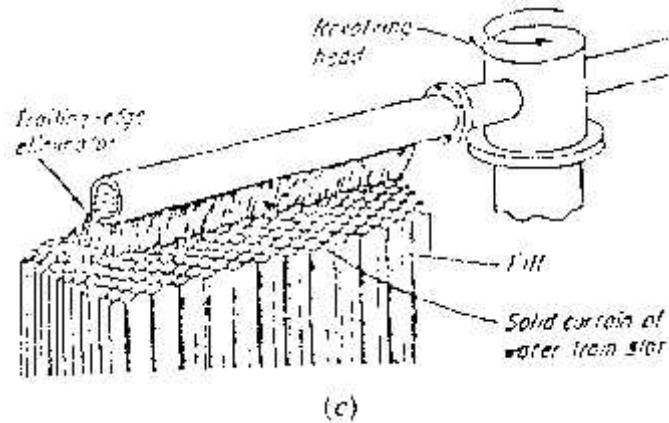
Spraydistribution sebagian besar digunakan pada menara pendingin aliran berlawanan, terdiri dari susunan pipa yang menyilang dengan menggunakan *spray* jenis *nozzle*.



Gambar 2.5. Sistem *Spray* Distribusi.

c. Distribusi Putaran

Distribusi putaran terdiri dari dua slot lengan distributor yang berputar melalui poros utama dimana air mengalir dengan tekanan rendah.



Gambar 2.6. Sistem Distribusi Air Jenis Putaran.

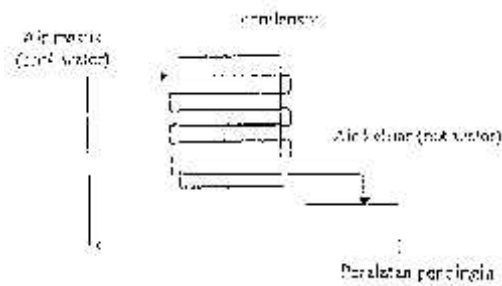
Sistem Sirkulasi Air

Fungsi system sirkulasi air adalah menyediakan air pendingin untuk peralatan yang membutuhkan air pendingin atau menjadi media untuk pembuangan kalor ke lingkungan. Sistem sirkulasi air yang diperlukan untuk membuang kalor ke lingkungan harus dilakukan dengan cara efisien, tetapi juga memenuhi peraturan mengenai pembuangan thermal. Fungsi dari sirkulasi air sangat penting bagi efisiensi sebuah instalasi daya secara keseluruhan, sebagai contoh kondensor pada instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang beroperasi pada suhu rendah akan menghasilkan kerja turbin yang maksimum. System sirkulasi air diklasifikasikan secara umum menjadi :

2.5.1. Sistem Untai Terbuka (*Open Loop*)

Pada sistem untaian terbuka (*Open Loop*) ini air diambil dari sumber alam seperti danau, sungai ataupun laut yang dipompakan melalui kondensor, setelah air keluar dari kondensor menjadi panas lalu dibuang kembali ke sumber alam.

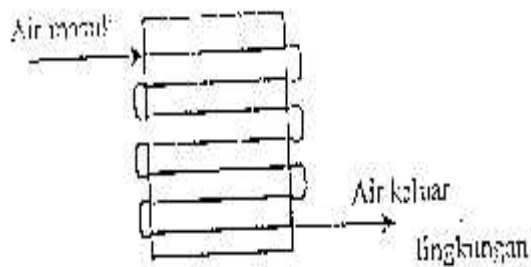
Sistem Untai terbuka (*OpenLoop*) ini merupakan cara yang paling efisien untuk pembuangan kalor. Cara ini efisien karena menggunakan air pendingin langsung dari lingkungan. Akan tetapi ada peraturan lingkungan yang membatasi penggunaan air permukaan atau membatasi suhu pemanasan air lingkungan.



Gambar 2.7. Sistem Untai Terbuka (*Open Loop*).

2.5.2. Sistem Untai Tertutup (*Closed Loop*)

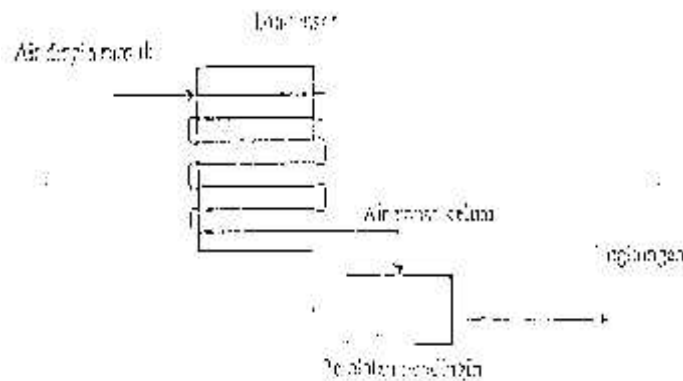
Pada sistem ini air diambil dari kondensor dilewatkan melalui peralatan pendinginan, dan dikembalikan lagi ke kondensor, kadang-kadang antara alat pendingin dan kondensor itu ada suatu *reservoir*. Biasanya peralatan pendingin yang digunakan dalam sistem ini adalah menara pendingin.



Gambar 2.8. Sistem Untai Tertutup (*Closed Loop*).

2.5.3. Sistem Gabungan

Pada sistem gabungan, sistem untai terbuka digabungkan dengan peralatan menara pendingin untuk mendinginkan air sebelum dikembalikan ke lingkungan. Pendingin air yang dibuang ke lingkungan ini harus dilakukan karena air yang keluar dari kondensor masih terlalu tinggi suhunya dan tidak memenuhi peraturan mengenai pembuangan thermal ke lingkungan.



Gambar 2.9. Sistem Gabungan.

Besaran Termodinamika

Sifat-sifat udara basah yang digunakan dalam perhitungan untuk menentukan prestasi menara pendingin adalah :



Gambar 2.10. Rangedan Approach Cooling Tower.

2.7.1. Range

Range merupakan pengurangan suhu air yang melalui menara pendingin. *Range* yang tinggi berarti bahwa menara pendingin telah mampu menurunkan suhu air secara efektif, dan kinerjanya baik. Rumusnya adalah:

$$Range\ (^{\circ}C) = \text{suhu air masuk}\ (^{\circ}C) - \text{suhu air keluar}\ (^{\circ}C) \dots\dots\dots^1$$

2.7.2. Approach

Selisih antara suhu bola basah udara (*wetbulb*) yang masuk dan suhu air yang keluar. Semakin rendah *approach* semakin baik kinerja menara pendingin. Walaupun, *range* dan *approach* harus dipantau, *approach* merupakan indikator yang lebih baik untuk kinerja menara pendingin.

$$Approach\ (^{\circ}C) = \text{suhu air keluar}\ (^{\circ}C) - \text{suhu wet bulb}\ (^{\circ}C) \dots\dots\dots^2$$

¹ Stocker, W.F and Jones, J.W, Refrigerasi dan Pengkondisian Udara, Erlangga,1989,hal.342

2.7.3. Efektivitas

Efektivitas merupakan perbandingan antara *range* dan *range* ideal (dalam persentase), yaitu perbedaan antara suhu masuk air pendingin dan suhu *wetbulb*, atau dengan kata lain adalah = $Range / (Range + Approach)$. Semakin tinggi perbandingan ini, maka semakin tinggi efektivitas menara pendingin.

$$\text{Efektivitas} = \frac{\text{Range } (^{\circ}\text{C})}{\text{Range } (^{\circ}\text{C}) + \text{Approach } (^{\circ}\text{C})} \times 100\%$$

2.7.4. Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan merupakan panas yang dibuang dalam kKal/jam atau kW, sebagai hasil dari kecepatan aliran masa air, panas spesifik dan perbedaan suhu. Kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan rumus :

$$Q = m \times c \times \Delta T \quad (\text{kW}) \dots \dots \dots$$

Dimana :

Q = kapasitas pendinginan (kW)

m = laju massa aliran air (kg/s)

c = kalor spesifik air (kJ/kg°C)

T = perubahan suhu (°C)

2.7.5. Laju Perpindahan Kalor

Nilai laju perpindahan kalor dipengaruhi oleh nilai koefisien perpindahan kalor konveksi (hc), luas penampang (A) dan perbedaan suhu. Sehingga besarnya laju perpindahan kalor dapat dicari dengan rumus:

$$q = hc \times A \Delta T \dots\dots\dots^3$$

Dimana :

q = laju perpindahan kalor (kW)

h = koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = luas penampang (m^2)

T = perbedaan suhu ($^\circ C$)

2.7.6. Kehilangan Penguapan

Kehilangan penguapan merupakan jumlah air yang diuapkan untuk tugas pendinginan. Secara teoritis jumlah penguapan mencapai $1,8 m^3$ untuk setiap $10.000.000$ kKal panas yang dibuang.

2.7.7. Siklus Konsentrasi (C.O.C)

Siklus konsentrasi merupakan perbandingan padatan terlarut dalam air sirkulasi terhadap padatan terlarut dalam air *make up*.

³Holman, J.P, Perpindahan Kalor, Erlangga, 1984, hal.12

2.7.8. Kehilangan *Blow Down*

Kehilangan *blow down* tergantung pada siklus konsentrasi dan kehilangan penguapan dan dihitung dengan rumus:

$$\text{blow down} = \frac{\text{kehilangan penguapan}}{(C.O.C - 1)}$$

2.7.9. Perbandingan Cair/Gas (L/G)

Perbandingan L/G menara pendingin merupakan perbandingan antara laju alir massa air dan udara. Menara pendingin memiliki nilai desain tertentu, namun variasi karena musim memerlukan pengaturan dan perubahan laju alir air dan udara untuk mendapatkan efektivitas terbaik menara pendingin. Besarnya laju aliran massa air dengan laju aliran masa udara (L/G) sebesar 1,17 - 0,46.

$$\frac{L}{G} = \frac{m_w}{m_a} \dots \dots \dots$$

Besarnya laju masa aliran fluida dapat dicari dengan rumus neraca laju massa:

$$m = \rho \times Q$$

$$m = \rho \times v \dots \dots \dots^4$$

⁴Moran and Shapiro, Fundamental Engineering Of Thermodynamic Jilid 5, Wiley, 2006, hal.124

Dimana:

= perbandingan laju aliran massa air terhadap udara

= laju aliran massa air (kg/s)

= laju aliran massa udara (kg/s)

= densitas/kerapatan (kg/m³)

Q = debit (m³/s)

V = kecepatan fluida (m/s)

A = luas penampang (m²)

2.7.10. *Number of Transfer Unit* (NTU)

NTU adalah bilangan unit perpindahan kalor untuk menentukan prestasi yang dihasilkan oleh *cooling tower*. Semakin besar nilai NTU maka semakin besar kapasitas untuk menurunkan suhu yang sama pada cooling tower tersebut. Berikut ini rumus-rumus yang digunakan untuk menentukan nilai NTU :

a. Harga entalpi udara tiap bagian (h_{u1}) :

$$h_{u1} = h_{u0} + 4,19 \left[\frac{L}{G} \right] \Delta t \dots\dots\dots$$

b. Harga entalpi udara pada suhu tengah (hu_{01}) :

$$hu_{01} = \frac{hu_0 + hu_1}{2}$$

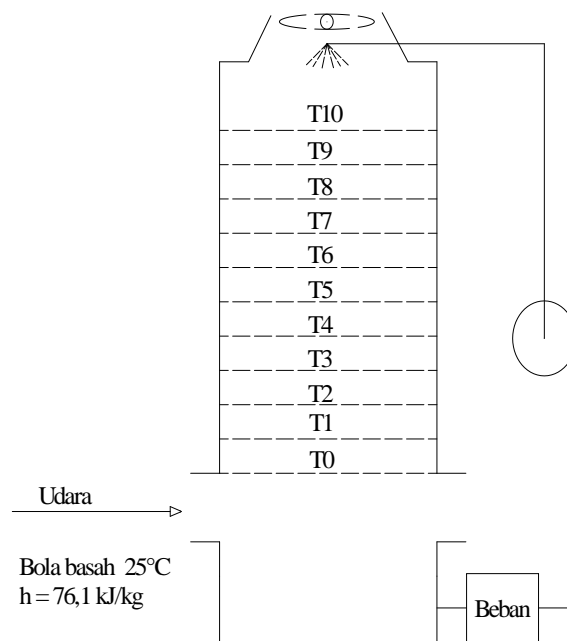
c. Harga suhu tengah (Tu_{01}):

$$Tu_{01} = T_0 + \frac{\Delta t}{2}$$

d. Harga NTU dinyatakan dalam :

$$\left[\frac{h_c A}{C_{p,m}} \right] = 4,19 L \cdot \Delta t \sum \frac{1}{(h_j - h_u)_{01}} \dots$$

Langkah – langkah perhitungan NTU :



Gambar 2.11. Pembagian Menara Menjadi Ruas – ruas Volume.

a. Pada menara pendingin terbagi n bagian fill, maka akan terjadi penurunan suhu air pada tiap-tiap bagian fill. Penurunan suhu air dapat dicari dengan

menggunakan rumus rata-rata perubahan temperatur tiap bagian elemen volume (T)

$$\Delta T = \frac{\text{range}}{\text{jumlah bagian fill}} (^\circ\text{C})$$

$$\Delta T = \frac{T_{w1} - T_{w2}}{10} (^\circ\text{C})$$

T = Rata-rata perubahan temperatur tiap bagian fill ()

T_{w1} = Suhu air masuk ()

T_{w2} = Suhu air keluar ()

Jika diasumsikan bahwa terdapat $n=10$

Sehingga ($T_1 - T_{10}$) dapat dihitung:

$$T_{10} = T_{w1} - T \qquad T_5 = T_6 - T$$

$$T_9 = T_{10} - T \qquad T_4 = T_5 - T$$

$$T_8 = T_9 - T \qquad T_3 = T_4 - T$$

$$T_7 = T_8 - T \qquad T_2 = T_3 - T$$

$$T_6 = T_7 - T \qquad T_1 = T_2 - T$$

- b. Langkah berikutnya adalah menentukan suhu air jatuh pada bagian dasar menara pendingin dengan menggunakan thermometer.

Suhu bola basah udara yang masuk dapat digunakan untuk mencari entalpi, sedangkan jika udara jenuh maka besarnya entalpi dicari pada

tabel sifat-sifat termodinamik udara jenuh pada tekanan atmosfer. Keseimbangan energy pada bagian paling bawah menara pendingin akan memberikan hasil :

$$h_{a,1} - h_{a,0} = \frac{L}{G} 4,19(\Delta T) \text{ (kJ/kg)}$$

$h_{a,1}$ = Entalpi udara pada step pada fill 1 (kJ/kg).

$h_{a,0}$ = Entalpi udara masuk (kJ/kg).

4,19 = Kemiringan garis kerja udara (kW).

L = Laju air yang masuk (kg/detik).

G = Laju udara yang masuk (kg/detik).

T = Rata-rata perubahan temperatur tiap step pada fill ().

- c. Menentukan harga tengah suhu pada tiap step pada fill ().
- d. Menentukan entalpi udara (h_a rata-rata (kJ/kg)) tiap step pada fill.
- e. Menentukan entalpi udara jenuh (h_i rata-rata (kJ/kg)) tiap step pada fill.
- f. Menentukan perbedaan harga tengah entalpi untuk suatu bagian kecil suatu volume ($h_i - h_a$)_m kJ/kg. Sehingga harga NTU dapat dihitung dengan persamaan:

$$\left[\frac{h_c A}{C_{p,m}} \right] = 4,19 L \Delta t \sum \frac{1}{(h_j - h_u)_{01}}$$