

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Mustaqim (2009) melakukan penelitian tentang sudut susunan elemen *filler* terhadap karakteristik daya *cooling tower*. Variasi sudutnya yaitu  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ , dan  $45^\circ$  serta laju air yaitu  $0,03 \text{ g/s}$ . Dalam penelitian ini dikaji karakter hubungan antara laju daya *fan* terhadap laju kalor dari *cooling tower*. Dari penelitian tersebut harga perbandingan antara daya *fan* dan laju kalor yang paling optimum terjadi pada  $20000 < Re < 25000$ .

Bahrul Ulum (2011) melakukan penelitian dengan metode eksperimental nyata (*True experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut aliran udara yang keluar dari blower terhadap unjuk kerja *cooling tower*. Dalam penelitian tersebut variasi yang digunakan adalah debit udara masuk *cooling tower* yang divariasikan 20, 25, dan 30 liter/sec. Dari penelitian tersebut diperoleh nilai unjuk kerja paling tinggi yaitu pada variasi sudut aliran udara  $45^\circ$  dan debit udara masuk *cooling tower* 30 liter/sec.

### 2.2 Cooling Tower

#### 2.2.1. Pengertian dan Prinsip Kerja *Cooling Tower*

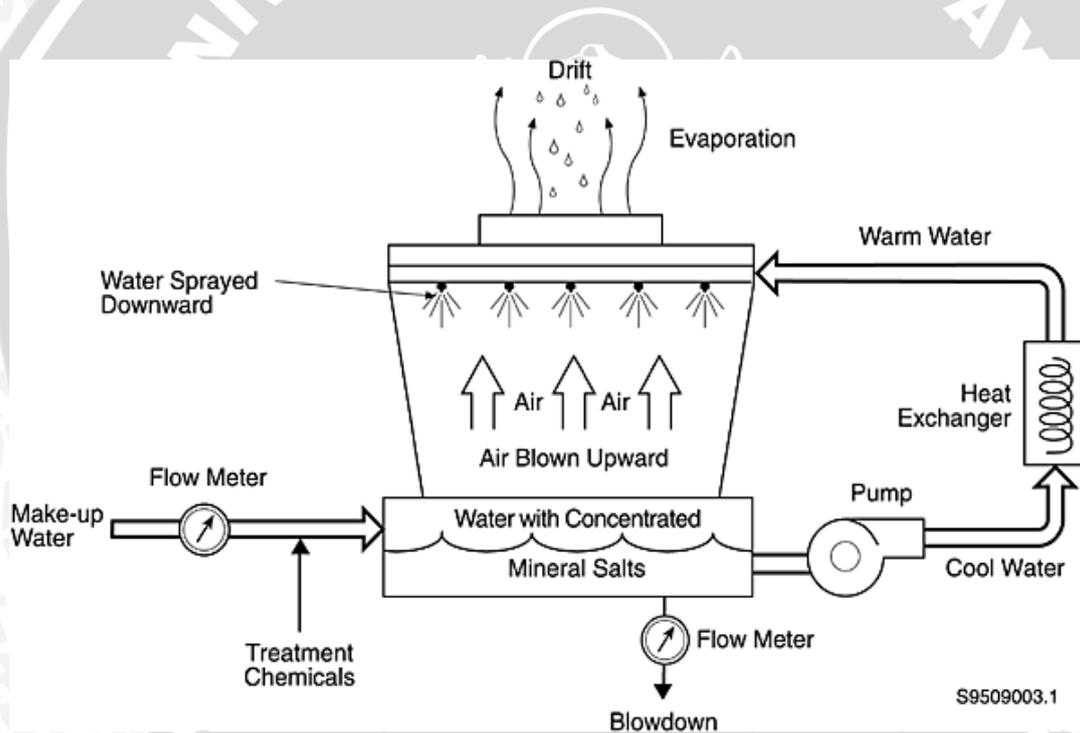
*Cooling Tower* merupakan peralatan pembuang kalor yang bekerja berdasarkan mekanisme pendinginan air dengan menggunakan udara yang berkontak secara langsung dan menguapkan sebagian air tersebut (Stoecker;1987:241).

*Cooling tower* mampu menurunkan suhu air lebih rendah dari jenis peralatan yang hanya menggunakan udara untuk membuang panas, seperti radiator dalam mobil atau menara pendingin kering. *Cooling tower* menggunakan penguapan dimana sebagian air diuapkan ke aliran udara yang bergerak dan kemudian dibuang ke atmosfer. Sebagai akibatnya, air yang tersisa didinginkan secara signifikan.

Penguapan pada *cooling tower* terjadi karena perbedaan tekanan antara air dengan uap air di udara yang mengakibatkan terjadinya perpindahan kalor laten dari air ke udara. Kalor laten dari air ikut terbawa oleh uap air yang terbentuk pada permukaan air sehingga terjadi perbedaan konsentrasi uap air diantara lapisan

permukaan air dan udara. Perbedaan inilah yang mengakibatkan udara menjadi jenuh karena uap air akan berdifusi dari air ke udara.

Prinsip kerja dari *cooling tower* dapat dilihat pada gambar 2.1. Air dingin (*cool water*) dipompakan melalui *heat exchanger* sehingga temperaturnya akan naik dan menjadi *warm water*. Kemudian didalam *cooling tower*, *warm water* akan disemprotkan melalui *water sprayed downward* dan akan berkontak langsung dengan udara sekitar (*air blown upward*) yang bergerak secara paksa karena pengaruh *fan* yang dipasang diatas *cooling tower* dan terjadilah *evaporation*. Air yang hilang karena penguapan (*evaporation*) diantisipasi dengan sistem air tambahan (*make-up water*).



Gambar 2.1. Diagram Skematik Sistem Menara Pendingin.

Sumber : <http://cooling-tower-online.com/page/1>

### 2.2.2 Bagian – Bagian Pada *Cooling Tower*

Secara umum pada gambar 2.2 komponen dasar sebuah *Cooling tower* meliputi motor listrik, kipas (*fan*), bahan pengisi (*filler*), lubang pipa penghubung, penampung air (*water basin*), *cooling tower chasing*, pipa *sprinkler*, kerangka pendukung menara. Kesemuanya dijelaskan dibawah ini :



Gambar 2.2 : Bagian – bagian *cooling tower*  
Sumber : Southwest Thermal Technnology Inc. (n.d)

#### 1. Motor listrik

Berfungsi untuk memutar poros langsung dengan kipas (*fan*).

#### 2. Kipas (*fan*)

Kipas merupakan bagian terpenting dari sebuah *cooling tower* karena berfungsi untuk menarik atau mendorong udara dingin dan mensirkulasikan udara tersebut di dalam *cooling tower* untuk mendinginkan air. Jika kipas tidak

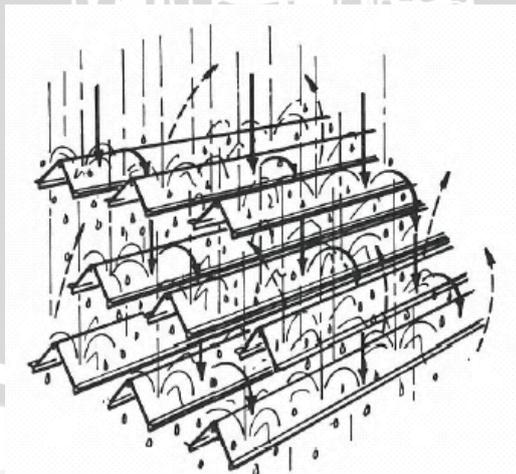
berfungsi maka kinerja *cooling tower* tidak akan optimal. Kipas digerakkan oleh motor listrik yang dihubungkan langsung dengan poros kipas.

### 3. Bahan Pengisi (*filler*)

Dalam menara pendingin, air panas didistribusikan diatas media pengisi dan didinginkan melalui penguapan ketika menuruni menara dan bersentuhan dengan udara. Bahan pengisi (*Filler* atau *Packing*) merupakan jantung dari *cooling tower*. Selain kuat, isian ini juga harus mampu menimbulkan kontak air dengan udara agar terjadi perpindahan panas dan massa dengan baik, serta memiliki hambatan yang rendah terhadap aliran udara. Isian harus kuat, ringan, dan tahan lapuk. Bahan pengisi biasanya terbuat dari plastik, termasuk *PVC*, *Polypropylene*, dan polimer lainnya. Pada dasarnya ada tiga jenis isian :

#### a. Jenis Percik (*Splash Type*)

Isian percik biasanya terbuat dari batang-batang yang tersusun berlapis-lapis yang memecah air menjadi butiran-butiran pada waktu turun dari lapisan yang satu menuju di bawahnya. Batangan itu ada berbagai bentuk tipis, siku ada yang licin atau kasar. Pada gambar 2.3 Isian percik (*Splash Fill*) dapat menghasilkan perpindahan kalor dan perpindahan massa yang baik antara air dan udara.

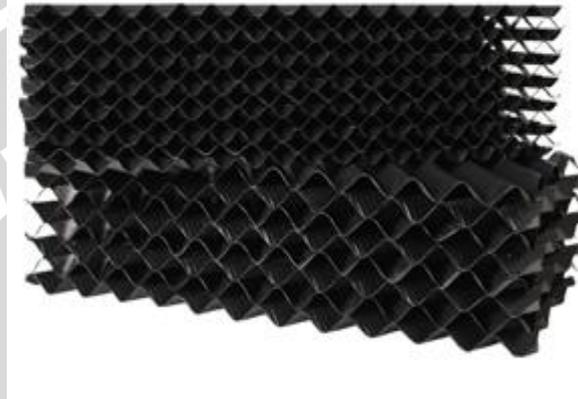


Gambar 2.3 : *Splash Fill*

Sumber : <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/ChapterIIP6.jpg>

b. Jenis Bukan Percik/film (Non Splash Type)

Pada gambar 2.4 *filler* bukan percik biasanya terbuat dari lembaran vertical yang mempunyai permukaan penyerap (adsorbent) yang kasar dan mudah basah sehingga air jatuh menempel pada permukaan vertical. Isian film terbuat dari berbagai bahan : belah kayu merah, lembaran gelombang selulosa, lembaran asbes semen.

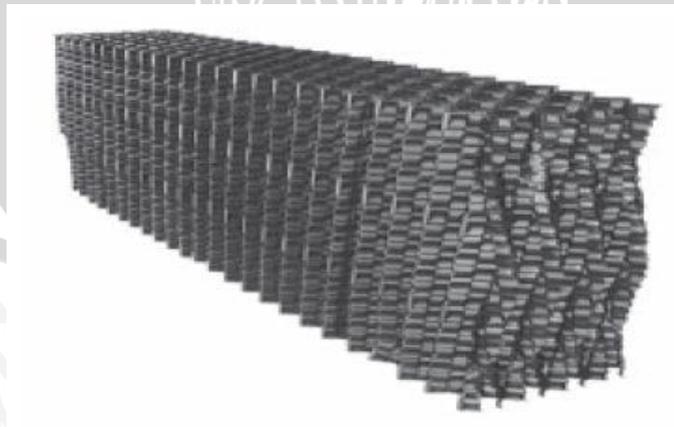


Gambar 2.4 : *Film Fill*

Sumber : <http://www.southerncooling.net/images/counterflow-film-fill.jpg>

c. Bahan pengisi sumbatan rendah (*Low-clog film fill*)

Bahan pengisi sumbatan rendah saat ini dikembangkan untuk menangani air yang keruh. Jenis pada gambar 2.5 ini merupakan pilihan terbaik untuk air laut karena adanya penghematan daya dan kinerjanya dibandingkan tipe bahan pengisi jenis percikan konvensional.



Gambar 2.5 : *Low-clog Film Fill*

Sumber : [http://www.sunkeyfrp.com/images/cooling\\_tower\\_fill01.jpg](http://www.sunkeyfrp.com/images/cooling_tower_fill01.jpg)

4. Lubang pipa penghubung

Lubang ini berfungsi untuk menghubungkan antara *cooling tower* dengan pipa dimana pipa tersebut berisi air yang sudah didinginkan.

5. Penampung air (*water basin*)

*Water basin* berfungsi sebagai pengumpul air sementara yang jatuh dari *filling material* sebelum disirkulasikan kembali ke kondensor.

6. *Cooling tower casing*

*Cooling tower casing* harus memiliki ketahanan yang baik terhadap segala cuaca dan umur pakai (*life time*) yang lama. *Casing* terbuat dari seng.

7. Pipa *sprinkler*

Pipa *sprinkler* merupakan pipa yang berfungsi untuk menyemprotkan air secara merata pada *cooling tower*, sehingga perpindahan kalor air dapat menjadi efektif dan efisien. Pipa *sprinkler* dilengkapi dengan lubang-lubang kecil untuk menyalurkan air.

8. Kerangka pendukung menara (*tower supporter*)

Kerangka pendukung menara berfungsi untuk mendukung *cooling tower* agar dapat berdiri kokoh dan tegak. *Tower supporter* terbuat dari baja.

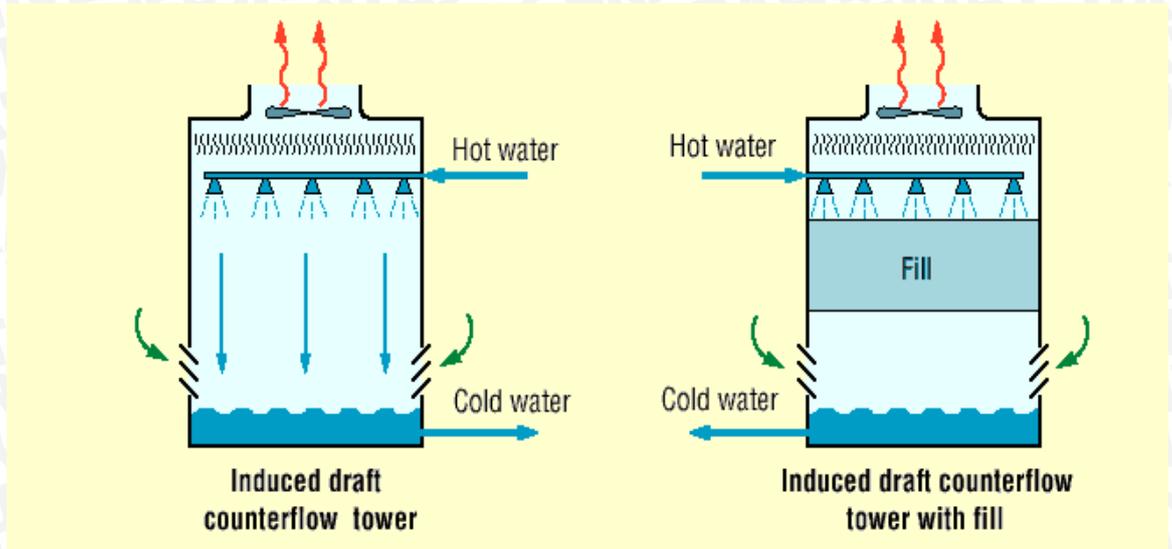
### 2.2.3. Klasifikasi *Cooling Tower Mechanical Draft Tower*

*Cooling tower* tipe *Mechanical Draft Tower* bekerja ketika udara berpindah karena satu atau beberapa fan yang digerakkan secara mekanik (El-Wakil;1992:256).

Pada umumnya pengklasifikasian *cooling tower* jenis ini dilakukan berdasarkan sirkulasi air yang terdapat di dalamnya.

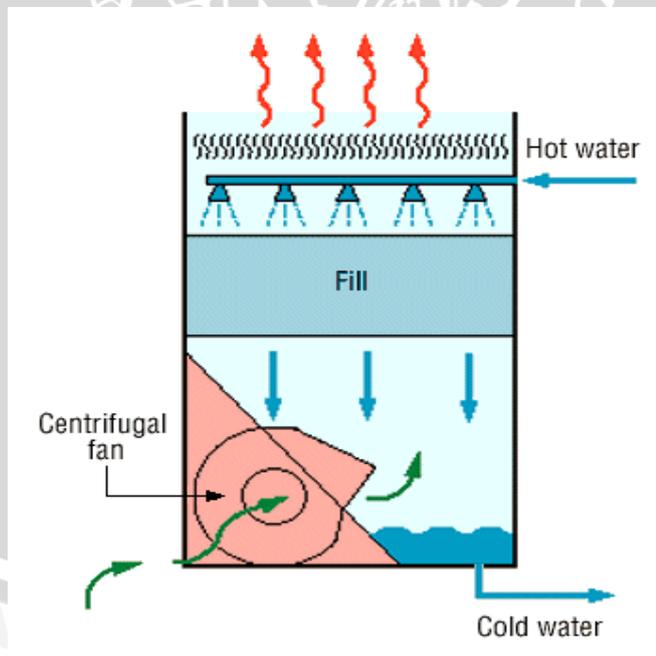
*Cooling tower* tipe *mechanical draft tower* dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu *Induced draft* dan *Forced draft*.

- a. *Induced draft*, udara dihisap ke dalam menara oleh fan yang terletak di atas melalui bagian bawah.



Gambar 2.6. *Induced draft Cooling tower* dengan aliran berlawanan.  
 Sumber : <http://cooling-tower-online.com/page/6>

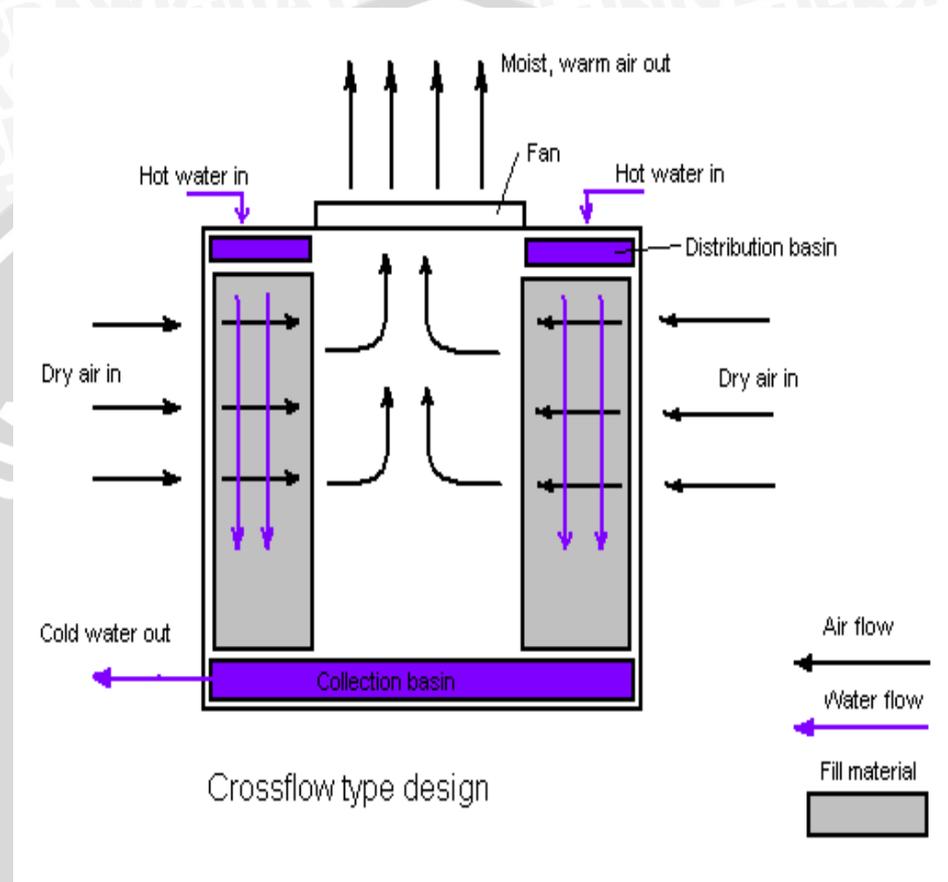
- b. *Forced draft*, udara yang dimasukkan ke dalam menara oleh fan yang terletak di bagian bawah dan dikeluarkan melalui atas.



Gambar 2.7. *Forced draft Cooling tower*.  
 Sumber : <http://cooling-tower-online.com/page/6>

Setiap jenis dari *cooling tower* tersebut terdiri dari dua macam, yaitu *crossflow* (aliran silang) dan *counterflow* (aliran berlawanan). Disebut *crossflow* apabila aliran udara dan aliran air saling bersilangan. Sedangkan bila aliran udara arahnya saling berlawanan disebut *counterflow*. Masing-masing jenisnya adalah sebagai berikut :

1. *Crossflow*



Gambar 2.8. *Croos Flow Type Design*

Sumber : <http://Wikipedia.com/page/1>

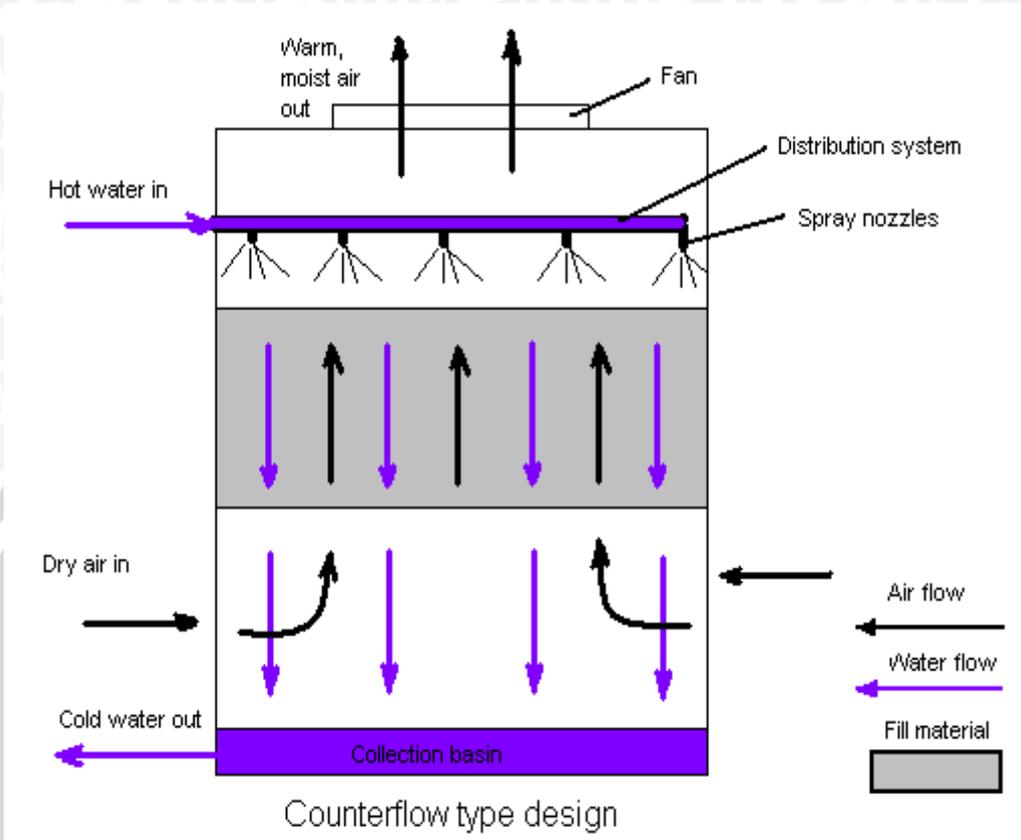
Keuntungan :

- a. Head yang dibutuhkan dari pompa rendah
- b. Biaya operasi dan konsumsi energi rendah
- c. Perawatan mudah

Kerugian :

- a. Head rendah dapat mengakibatkan *clogging* (tersumbat)
- b. Peristiwa *Icing* (menjadi Kristal-kristal es) yang sulit dikontrol

2. Counterflow



Gambar 2.9. Counter Flow Type Design  
 Sumber : <http://Wikipedia.com/page/1>

Keuntungan :

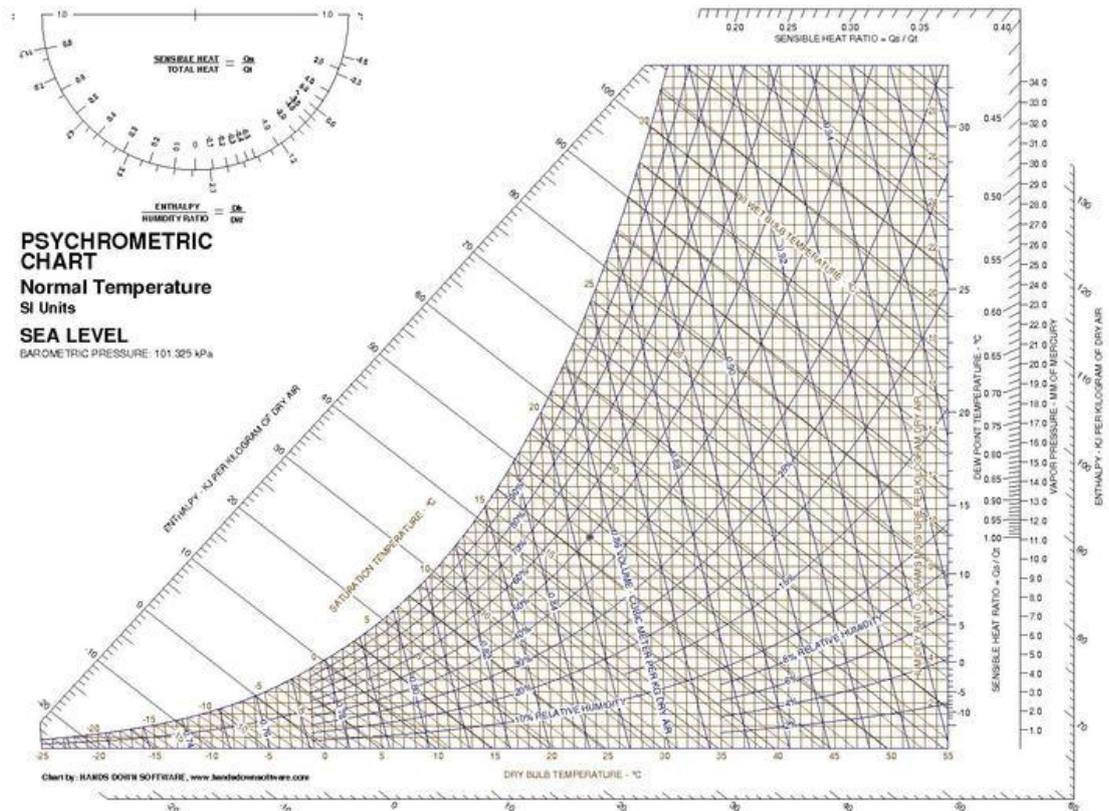
- a. Range yang dihasilkan lebih besar
- b. Udara yang digunakan lebih efisien
- c. Pergerakan udara vertical membuat performa meningkat

Kerugian :

- a. Daya fan yang dibutuhkan lebih besar
- b. Head yang dibutuhkan lebih tinggi
- c. Biaya operasi dan konsumsi energi lebih besar

### 2.3 Istilah Yang Digunakan dalam *Cooling Tower*

Beberapa persamaan yang sering dipakai dalam perhitungan perpindahan panas dalam *cooling tower* berasal dari diagram psikometri seperti yang ditunjukkan dari gambar 2.10 dibawah ini :



Gambar 2.10 : Diagram *Psychrometric*  
Sumber : Notes Of Technology

Psikrometri (*psychrometri*) adalah istilah yang digunakan untuk menunjukkan suatu ilmu dalam bidang teknik yang berhubungan dengan penentuan sifat fisik dan termodinamika campuran antara air dan gas. Meskipun prinsip – prinsip psikometri berlaku untuk setiap sistem fisik yang terdiri dari campuran air dan gas, sistem yang paling umum yang menarik adalah campuran uap air dan udara, karena penerapannya dalam pemanasan, ventilasi, dan pendingin udara.

Berikut beberapa istilah – istilah yang digunakan dalam mempelajari *cooling tower*, yaitu:

a. Kelembaban relatif ( $\phi$ )

Kelembaban relatif ( $\phi$ ) didefinisikan sebagai rasio dari tekanan parsial uap air dalam campuran terhadap tekanan uap jenuh air pada temperatur yang sama. Kelembaban relatif dapat dinyatakan dengan:

$$\phi = \frac{p_s}{p_w} \dots \dots \dots (\text{Stoecker, 1996:40}) \quad (2-1)$$

Dimana:

$\phi$  = kelembaban relatif (%)

$p_s$  = tekanan parsial uap air di atmosfer (Pa)

$p_w$  = tekanan uap jenuh air murni pada suhu yang sama (Pa)

b. Kelembaban absolut ( $\omega$ )

Kelembaban absolut adalah perbandingan massa uap air dengan massa udara kering dalam udara atmosfer. Persamaan kelembaban absolut adalah sebagai berikut:

$$\omega = 0,622 \frac{p_s}{p_t - p_s} \dots \dots \dots (\text{Stoecker, 1996:41}) \quad (2-2)$$

Dengan:

$\omega$  = rasio kelembaban (kg uap air/kg udara kering)

$p_t$  = tekanan atmosfer (Pa)

$p_s$  = tekanan parsial uap air (Pa)

c. Entalpi

Entalpi adalah istilah yang menyatakan jumlah energi internal dari suatu sistem termodinamika ditambah energi yang digunakan untuk melakukan kerja. Entalpi campuran udara kering dan uap air adalah jumlah dari entalpi udara kering dan entalpi uap air.

$$h = c_p \times T + W \times h_g \dots \dots \dots (\text{Stoecker, 1996:42}) \quad (2-3)$$

dengan :

$h$  = entalpi campuran udara kering dan uap air, (kJ.kg<sup>-1</sup>)

$c_p$  = kalor spesifik udara kering pada tekanan konstan = 1,0 (kJ.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>)

$T$  = suhu campuran udara dan uap, (K)

$h_g$  = entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara dan uap, (kJ.kg<sup>-1</sup>)

d. Volume spesifik

Volume spesifik adalah volume udara campuran dengan satuan meter kubik per kilogram udara kering. Dapat juga dikatakan sebagai meter kubik udara kering atau meter kubik campuran per kilogram udara kering, karena volume yang diisi oleh masing – masing substansi sama. Dari persamaan keadaan gas ideal, volume spesifik  $v$  adalah

$$v = \frac{R_a T}{P_{atm} - P_s} \dots \dots (Stoecker, 1996:43) \quad (2-4)$$

Dimana:

$v$  = volume spesifik (m<sup>3</sup>/kg)

$R_a$  = tetapan gas untuk udara kering = 287 (J/kg.K)

$p_{atm}$  = tekanan atmosfer (Pa)

$p_s$  = tekanan uap air parsial dalam keadaan jenuh (Pa)

e. Temperatur.

Pada psikrometri ada tiga istilah untuk besaran temperatur, yaitu temperatur bola kering (*dry bulb*), temperatur bola basah (*wet bulb*), dan *dew point*. Temperatur bola kering adalah temperatur dari termometer yang bola sensornya terbuka ke atmosfer, temperatur bola basah adalah temperatur dari termometer yang bola sensornya dibungkus dengan kain basah. Sedangkan temperatur *dew point* adalah temperatur saat uap air di atmosfer mulai mengembun.

f. Keseimbangan energi dan massa

1. Persamaan Bernoulli

Persamaan Bernoulli menyatakan hubungan antara tekanan, kecepatan dan elevasi pada fluida dalam suatu saluran, dimana diasumsikan aliran *steady*, tidak ada gesekan dan fluida dianggap inkompresibel. Persamaan ini dituliskan

$$\frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2} + g.z = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 – 116}) \quad (2-5)$$

dimana:

$p$  = tekanan fluida [Pa]

$\rho$  = massa jenis fluida [ kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = kecepatan fluida [m/s]

$g$  = percepatan gravitasi [ $m/s^2$ ]

$z$  = beda elevasi [ $m$ ]

## 2. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menyatakan kesetimbangan massa fluida yang *steady* dalam saluran dengan kecepatan  $v$  [ $m/s$ ] dan luas penampang saluran  $A$  [ $m^2$ ] dan dituliskan:

$$\rho \cdot v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 – 114}) \quad (2-6)$$

untuk fluida inkompresible, harga  $\rho$  konstan sepanjang saluran, sehingga persamaan ini banyak dinyatakan dengan kapasitas  $Q$  [ $m^3/s$ ]

$$Q = v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 – 114}) \quad (2-7)$$

### 2.4 Unjuk Kerja Cooling Tower

#### 1. Laju perpindahan kalor *Cooling Tower*

Pada proses ini yang terjadi adalah perpindahan kalor secara konveksi, khususnya konveksi paksa, karena udara sebagai salah satu fluida kerjanya dihembuskan dengan bantuan gaya luar yaitu *blower*. Secara umum besarnya perpindahan kalor secara konveksi dapat dinyatakan menurut hukum Newton tentang pendinginan sebagai berikut:

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Holman, 1994 : 252}) \quad (2-8)$$

dimana:

$\dot{m}$  = laju massa aliran

$C_p$  = kalor spesifik

$\Delta T$  = Selisih temperatur antara air masuk dan air keluar *cooling tower*

#### 2. Efektivitas *cooling tower*

Efektivitas (*Effectiveness*) suatu alat penukar kalor adalah kemampuan untuk melepas kalor secara aktual dibandingkan dengan kalor maksimum yang mungkin dilepas.

Dengan demikian efektivitas alat penukar kalor dirumuskan dengan:

$$\varepsilon = \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{max}}} \quad (\text{Holman, 1994: 498}) \quad (2-9)$$

### 3. Number Transfer Unit (NTU)

Sebagai alat penukar kalor, performa sebuah *cooling tower* juga dinyatakan dalam *NTU* yang merupakan tolak ukur perpindahan kalor dari alat penukar kalor tersebut. Semakin besar harga *NTU* menunjukkan bahwa penukar kalor itu semakin mendekati batas termodinamikanya. Menurut W.F. Stoecker (1996:347),  $\frac{h_c A}{C_{pm}}$  dapat didefinisikan dalam istilah lain yaitu *NTU* (*Number of Transfer Unit*). Secara umum *NTU* untuk sebuah *cooling tower* dirumuskan dengan:

$$NTU = \frac{U.A}{\dot{m} \cdot C_p} \quad (\text{Holman, 1994:507}) \quad (2-10)$$

Sedangkan menurut Lu Lu Wenjian Cai, *NTU* dari sebuah *cooling tower* bisa dirumuskan dalam bentuk:

$$NTU = -\frac{\ln\left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon m^*}\right)}{1-m^*} \quad (\text{Lu lu, 2000 : 3}) \quad (2-11)$$

$$\text{Dimana } m^* = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_w} \cdot \frac{C_s}{C_{pw}}$$

Dengan  $\dot{m}_a$  = laju aliran udara lembab masuk.

$\dot{m}_w$  = laju aliran udara lembab keluar.

$m^*$  = laju massa alir kritis.

$C_s$  merupakan kalor spesifik standar yaitu perbandingan  $\Delta h$  dengan  $\Delta T$  aktual

$$C_s = \frac{h_a - h_{awo}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

sehingga semakin tinggi *effectiveness* maka nilai *Number of Transfer Unit (NTU)* juga semakin tinggi.

## 2.5 Hipotesis

Pada nilai debit udara masuk yang tetap, semakin besar sudut semprotan air menyebabkan luasan permukaan kontak antara air dan udara juga semakin besar sehingga total area perpindahan kalor akan semakin besar dan unjuk kerja *cooling tower* tipe *cross flow* dengan *filler* juga semakin besar.

