

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° , 30° , dan 45° serta laju air yaitu 0,03 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 $20000 < Re < 25000$.

Mulyono (2010) menganalisa beban kalor *forced draft crossflow cooling tower* tanpa *filler* dengan debit air $0,0667 \text{ m}^3/\text{s}$, kecepatan udara masuk *cooling tower* rata-rata 3,1 m/s dengan temperatur 27°C sampai 34°C , temperatur air masuk *cooling tower* $35,5^\circ\text{C}$ hingga 41°C . Dari penelitian tersebut diperoleh jangkauan pendinginan (*cooling range*) terendah sebesar $3,0^\circ\text{C}$ dan tertinggi 6°C , kemudian pendekatan (*approach*) terendah $4,5^\circ\text{C}$ dan tertinggi $6,5^\circ\text{C}$ dengan rata-rata $5,8^\circ\text{C}$, efektivitas terendah 31,6% sampai 57,1%, dan beban pendinginan rata-rata 1330,4 kJ/s.

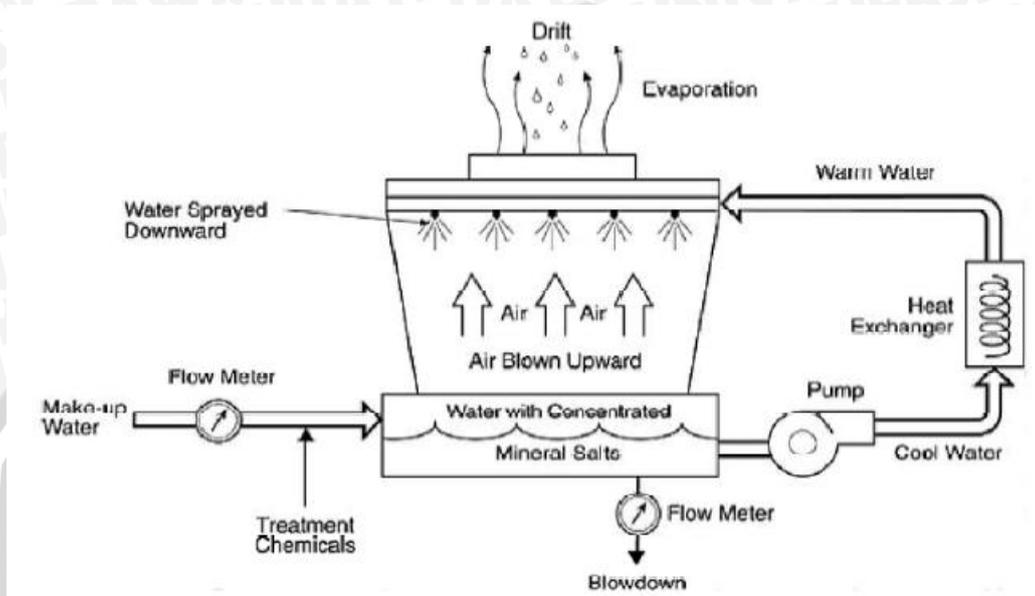
Djunaedi (2011) melakukan penelitian dengan metode eksperimental nyata (*True experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut semprotan air terhadap unjuk kerja *cooling tower* yang bertipe aliran *counter* tanpa *filler*. Dalam penelitian tersebut menggunakan variasi sudut semprotan air 60° , 70° , dan 80° . Dari penelitian tersebut diperoleh nilai unjuk kerja paling tinggi yaitu pada sudut semprotan air 80° dan debit udara 20 l/s.

2.2 Cooling Tower

2.2.1. Pengertian dan Prinsip Kerja Cooling Tower

Cooling tower adalah peralatan pembuang kalor yang bekerja berdasarkan mekanisme pendinginan air dengan menggunakan udara yang berkontak secara langsung dan menguapkan sebagian air tersebut (Stoecker, F.W dan Jerold W.J: 1987). *Cooling tower* sangat bergantung pada iklim setempat, mekanisme pembuangan panas dalam bentuk penguapan (*evaporation*) berkisar 75% pada cuaca panas dan 60% pada cuaca dingin dari beban pendinginan dan sisanya berupa penambahan panas sensible ke udara (El-Wakil, MM : 1992). *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. Pembuangan kalor sensibel ke udara lebih besar pada cuaca dingin dibandingkan cuaca panas.



Gambar 2.1. Skema *cooling tower*
Sumber : El Wakil, 1985 : 263

Prinsip kerja dari *cooling tower* dapat dilihat pada gambar diatas. 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*).

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.

2.2.2 Bagian – Bagian *Cooling Tower*



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

1. Motor listrik

Berfungsi untuk memutar poros yang dikopel 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 (*filling material*)

Filling material merupakan bagian dari *cooling tower* yang berfungsi untuk mencampurkan air panas yang disemprotkan dari nozel dengan udara yang bergerak naik. Air masuk yang mempunyai suhu yang cukup tinggi

akan disempatkan ke *filling material*. Pada *filling material* inilah air yang mengalir turun ke *water basin* akan bertukar kalor dengan udara segar dari atmosfer. Oleh sebab itu, *filling material* harus dapat menimbulkan kontak yang baik antara air dan udara agar terjadi laju perpindahan kalor yang baik. *Filling material* harus kuat, ringan dan tahan lapuk.

Filling material ini mempunyai peranan sebagai pemecah air menjadi butiran-butiran tetes air dengan maksud untuk memperluas permukaan pendinginan sehingga proses perpindahan panas dapat dilakukan seefisien mungkin. *Filling material* ini umumnya terdiri dari 2 jenis lapisan:

1. 1st level packing

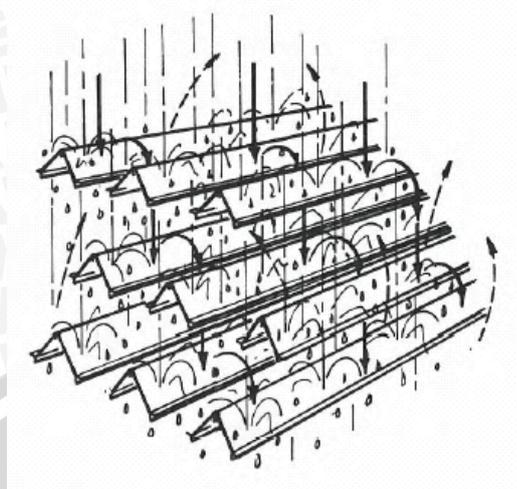
Merupakan *filling material* lapisan atas yang mempunyai celah sarang lebah lebih besar dimaksudkan untuk pendinginan tahap pertama. Fluida yang akan didinginkan pertama kali dialirkan ke lamella ini.

2. 2nd level packing

Merupakan *filling material* yang lebih lembut untuk *second stage* pendinginan. Pabrik *package cooling tower* umumnya merancang *filling material* pada stage ini lebih tebal sehingga dapat menampung kapasitas fluida yang lebih banyak. Jenis bahan pengisi dapat dibagi menjadi:

a. Bahan pengisi jenis percikan (*Splash fill*)

Air jatuh di atas lapisan yang berurutan dari pipa *sprinkler*, secara terus menerus pecah menjadi tetesan yang lebih kecil sambil membasahi permukaan bahan pengisi (*fill*). Luas permukaan butiran air adalah luas permukaan perpindahan kalor dengan udara. Bahan pengisi percikan dari plastik memberikan perpindahan kalor yang lebih baik daripada bahan pengisi percikan dari kayu.



Gambar 2.3 :*Splash Fill*
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.6)

b. Bahan pengisi jenis film (*film fill*)

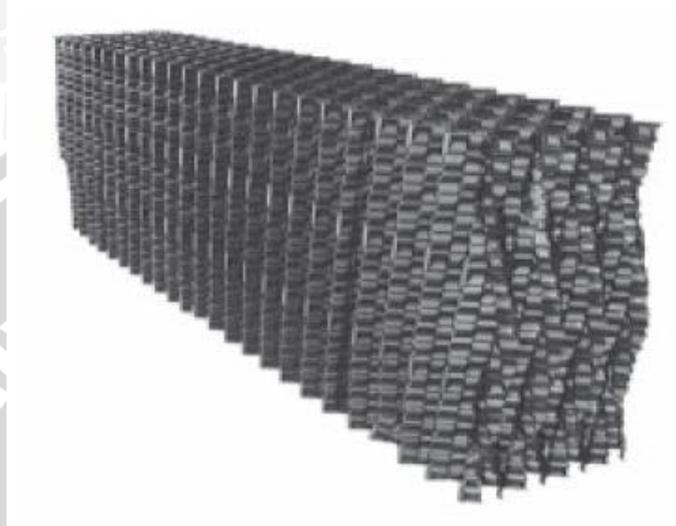
Terdiri dari permukaan plastik tipis dengan jarak yang berdekatan dimana di atasnya terdapat semprotan air, membentuk lapisan film yang tipis dan melakukan kontak dengan udara. Permukaannya dapat berbentuk datar, bergelombang, berlekuk, atau pola lainnya. Pada bahan pengisi film, air membentuk lapisan tipis pada sisi-sisi lembaran pengisi. Luas permukaan dari lembaran pengisi adalah luas perpindahan kalor dengan udara sekitar. Jenis bahan pengisi film lebih efisien dan memberi perpindahan kalor yang sama dalam volume yang lebih kecil daripada bahan pengisi jenis *splash*. Bahan pengisi film dapat menghasilkan penghematan listrik yang signifikan melalui kebutuhan air yang lebih sedikit dan head pompa yang lebih kecil.



Gambar 2.4 :*Film Fill*
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.7)

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

Bahan pengisi sumbatan rendah dengan ukuran *flute* yang lebih tinggi, saat ini dikembangkan untuk menangani air yang keruh. Jenis 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 :Bitstream USU ChapterII (hal.8)

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*

Ada banyak jenis klasifikasi *cooling tower*, namun pada umumnya pengklasifikasian dilakukan berdasarkan sirkulasi air yang terdapat di dalamnya. Menurut J.R. Singham *cooling tower* dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

1. Menara pendingin basah (*wet cooling tower*)
2. Menara pendingin kering (*dry cooling tower*)
3. Menara pendingin basah-kering (*wet-dry cooling tower*)

Setiap jenis *cooling tower* ini mempunyai kelebihan dan kekurangan masing - masing.

a. *Wet Cooling Tower*

Wet cooling tower mempunyai sistem distribusi air panas yang disemprotkan secara merata ke kisi-kisi, lubang-lubang atau batang-batang horizontal pada sisi menara yang disebut isian (*filler*). Udara masuk dari luar menara melalui kisi-kisi yang berbentuk celah-celah horizontal yang terpancang pada sisi *cooling tower*. Celah ini biasanya mengarah miring ke bawah supaya air tidak keluar. Oleh karena ada percampuran antara air dan udara terjadi perpindahan kalor sehingga air menjadi dingin. Air yang telah dingin itu berkumpul di kolam atau bak di dasar *cooling tower* dan dari situ diteruskan ke dalam kondensor atau dibuang keluar, sehingga udara lembab akan keluar dari atas *cooling tower*. Berdasarkan El. Wakil M.M, *wet cooling tower* dapat dibagi menjadi:

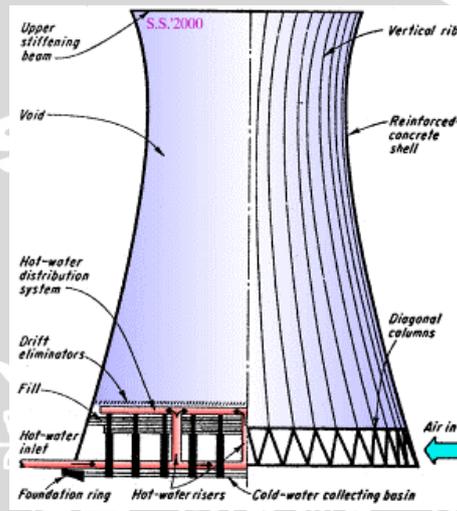
1. *Natural-Draft Cooling Tower*

Natural-Draft Cooling Tower pada mulanya berkembang di Eropa. Beberapa unit pertama dibangun di Belanda pada awal abad ke-19 yang terbuat dari kayu dan akhirnya dibuat dari beton bertulang seperti yang banyak digunakan sekarang ini.

Pada awalnya unit ini berbentuk silinder dan akhirnya berbentuk hiperbola yang umum dipakai sekarang ini. Alat ini digunakan secara luas terutama di Negara Inggris dan Amerika. *Natural-draft cooling tower* tidak menggunakan kipas (*fan*). Aliran udaranya bergantung semata-mata pada tekanan dorong alami. Pada *Natural-draft cooling tower* ini tidak ada bagian yang bergerak, udara

mengalir ke atas akibat adanya perbedaan massa jenis antara udara atmosfer dengan udara lembab di dalam *cooling tower* yang bersuhu lebih tinggi daripada udara atmosfer di sekitarnya. Karena perbedaan massa jenis ini maka timbul tekanan yang mendorong udara ke atas. Biasanya *cooling tower* tipe ini tingginya dapat mencapai ketinggian puluhan meter. *Natural-draft cooling tower* dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu:

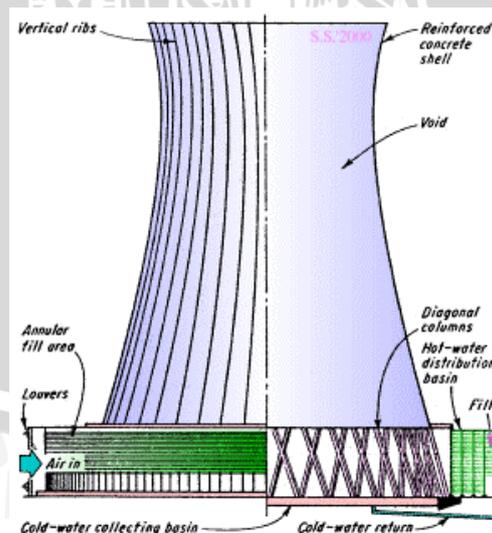
a. *Natural-Draft Cooling Tower counterflow*



Gambar 2.6. *Natural-Draft Cooling Tower counterflow*

Sumber : Bitstream USU Chapter II (hal.9)

b. *Natural-Draft Cooling Tower crossflow*



Gambar 2.7. *Natural-Draft Cooling Tower crossflow*

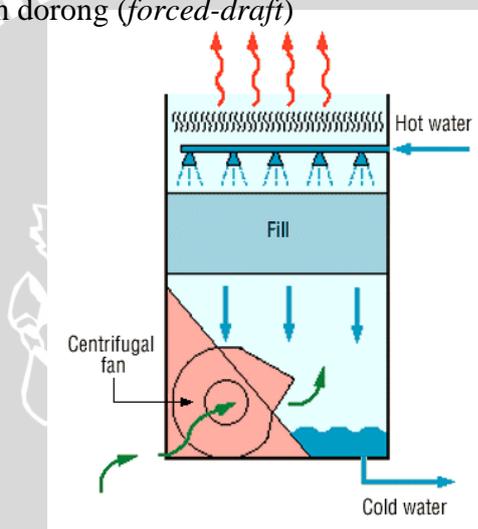
Sumber : Bitstream USU Chapter II (hal.10)

Dari kedua jenis *cooling tower* ini, *Natural-draft cooling tower crossflow* kurang disukai karena lebih sedikit memberi tahanan terhadap aliran udara di dalam *tower*, sehingga kecepatan udaranya lebih tinggi dan mekanisme perpindahan kalornya kurang efisien.

2. Mechanical-Draft Cooling Tower

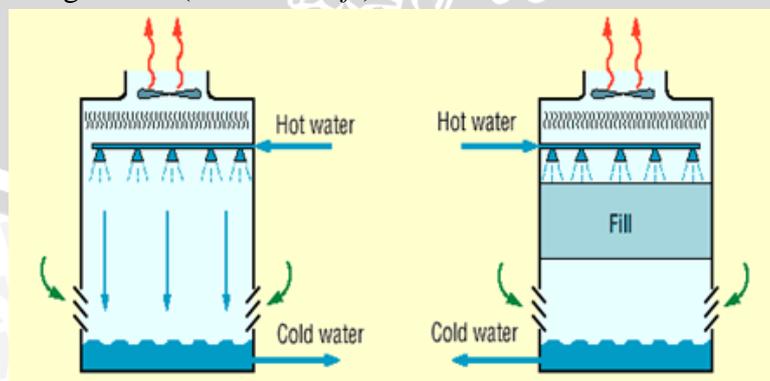
Pada *Mechanical-draft cooling tower*, udara mengalir karena adanya satu atau beberapa kipas (*fan*) yang digerakkan secara mekanik. Fungsi kipas di sini adalah untuk mendorong udara (*forced-draft*) atau menarik udara melalui *tower* (*induced-draft*) yang dipasang pada bagian bawah atau atas menara. Berdasarkan fungsi kipas yang digunakan menara pendingin aliran angin mekanik dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu:

- a. Tipe aliran angin dorong (*forced-draft*)

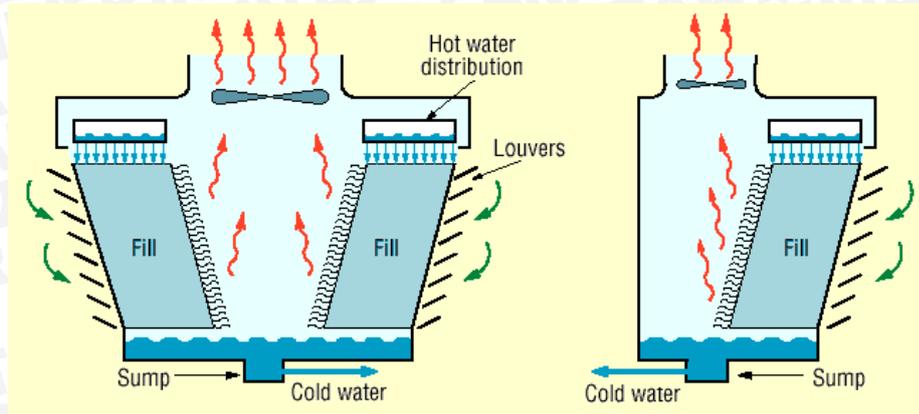


Gambar 2.8. *Forced-draft cooling tower*
Sumber : Geothermal Heat Pump Technology (GHP)

- b. Tipe aliran angin tarik (*induced draft*)



Gambar 2.9. *Induced draft cooling tower counterflow*
Sumber : Geothermal Heat Pump Technology (GHP)



Gambar 2.10.. *Induced draft cooling tower crossflow*

Sumber : Geothermal Heat Pump Technology (GHP)

Pada tipe aliran angin dorong (*forced-draft*), kipas yang dipasang pada bagian bawah, mendorong udara melalui *cooling tower*. Jenis ini secara teoritis lebih disukai karena kipas beroperasi dengan udara yang lebih dingin, sehingga konsumsi daya menjadi lebih kecil. Akan tetapi, berdasarkan pengalaman jenis ini memiliki masalah-masalah yang berkaitan dengan distribusi udara, kebocoran dan resirkulasi udara panas dan lembab kembali ke *tower*, serta masalah pembekuan pada masukan kipas ketika musim dingin.

Mengingat banyaknya permasalahan di atas maka pada saat ini *Mechanical-draft cooling tower* yang sering digunakan pada instalasi adalah tipe aliran angin tarik (*induced draft*). Pada *cooling tower* aliran tarik, udara masuk dari sisi menara melalui bukaan-bukaan yang cukup besar pada kecepatan rendah dan bergerak melalui bahan pengisi (*filling material*). Kipas dipasang pada puncak *cooling tower* dan membuang udara panas dan lembab ke atmosfer. Aliran udara masuk *cooling tower* pada dasarnya horizontal, tetapi aliran di dalam bahan pengisi (*filling material*) ada yang horizontal seperti yang terdapat pada *cooling tower cross flow* dan ada pula yang vertical seperti *cooling tower counter flow*.

Keunggulan *Mechanical-draft cooling tower* adalah:

1. Terjaminnya jumlah aliran udara dalam jumlah yang diperlukan pada segala kondisi beban dan cuaca.
2. Biaya investasi dan konstruksinya lebih rendah
3. Ukuran dimensinya lebih kecil.

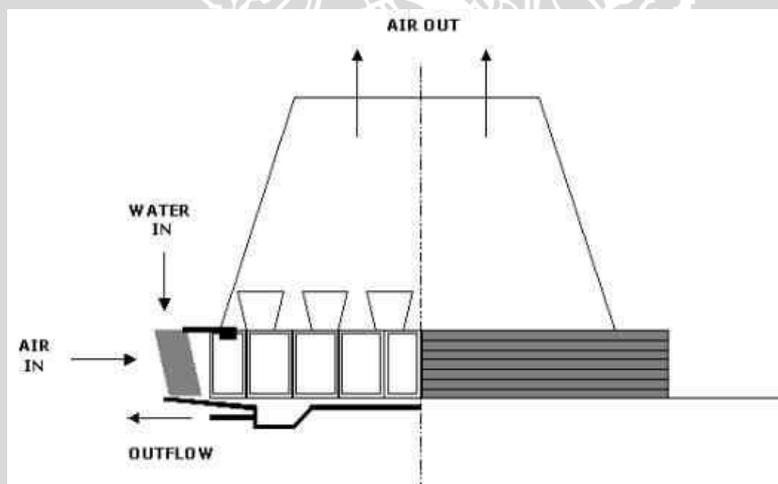
Kelemahan *Mechanical-draft cooling tower* adalah:

1. Kebutuhan daya yang besar

2. Biaya operasi dan pemeliharaan yang besar
3. Menghasilkan suara yang lebih ribut.

3. *Combined Draft Cooling Tower*

Natural-draft cooling tower biasanya mempunyai ukuran yang besar dan membutuhkan lahan yang luas, tetapi dengan konsumsi daya dan biaya operasi yang kecil. Sebaliknya *Mechanical-draft cooling tower* ukurannya lebih kecil, namun membutuhkan daya yang besar. Oleh sebab itu, kedua hal tersebut digabungkan di dalam *combined draft cooling tower*. *Tower* ini disebut juga *fan assisted hyperbolic tower* atau hibrida (*hybrid tower*). *Hybrid tower* terdiri dari cangkang beton, tetapi ukurannya lebih kecil dimana diameternya sekitar dua pertiga diameter menara aliran angin mekanik. Di samping itu, terdapat sejumlah kipas listrik yang berfungsi untuk mendorong angin. Menara ini dapat dioperasikan pada musim dingin tanpa menggunakan kipas, sehingga lebih hemat listrik.



Gambar 2.11. *Combined Draft Cooling Tower*
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.14)

b. *Dry Cooling Tower*

Dry cooling tower adalah *cooling tower* yang air sirkulasinya dialirkan di dalam tabung-tabung bersirip yang dialiri udara. Semua kalor yang dikeluarkan dari air sirkulasi diubah. *Dry cooling tower* dirancang untuk dioperasikan dalam ruang tertutup. *Cooling tower* jenis ini banyak mendapat perhatian akhir-akhir ini karena keunggulannya yaitu:

1. Tidak memerlukan pembersihan berkala sesering *wetcooling tower*

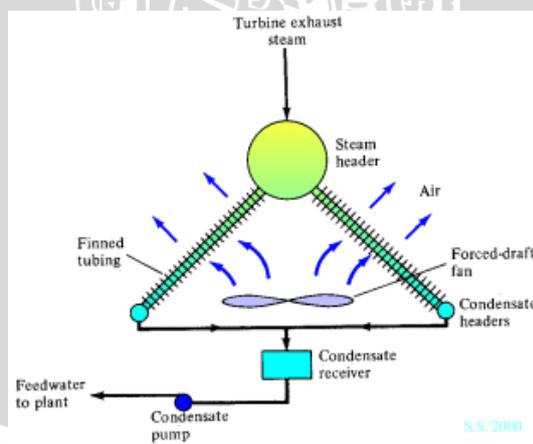
2. Tidak memerlukan zat kimia aditif yang banyak
3. Memenuhi syarat peraturan pengelolaan lingkungan mengenai pencemaran termal dan pencemaran udara pada lingkungan.

Meskipun begitu, *dry cooling tower* mempunyai beberapa kelemahan, yaitu efisiensinya lebih rendah, sehingga mempengaruhi efisiensi siklus keseluruhan. Ada dua jenis menara pendingin kering, yaitu:

1. *Direct dry-cooling tower*

Direct dry-cooling tower merupakan gabungan antara kondensor dan menara pendingin. Uap buangan turbin dimasukkan ke kotak uap melalui talang-talang besar supaya jatuh pada tekanan yang tidak terlalu besar dan dapat terkondensasi pada waktu mengalir ke bawah melalui sejumlah besar tabung atau kumparan bersirip. Tabung ini didinginkan dengan udara atmosfer yang mengalir di dalam atmosfer. Kondensat mengalir karena gaya gravitasi ke penampung kondensat dan dipompakan lagi ke sistem air umpan instalasi dengan bantuan pompa kondensat. Terdapat pula sistem untuk menyingkirkan gas dan mencegah pembekuan pada cuaca dingin. Beberapa kelemahan dari menara pendingin jenis ini adalah:

1. Hanya dapat beroperasi dengan volume besar.
2. Memerlukan talang-talang ukuran besar.



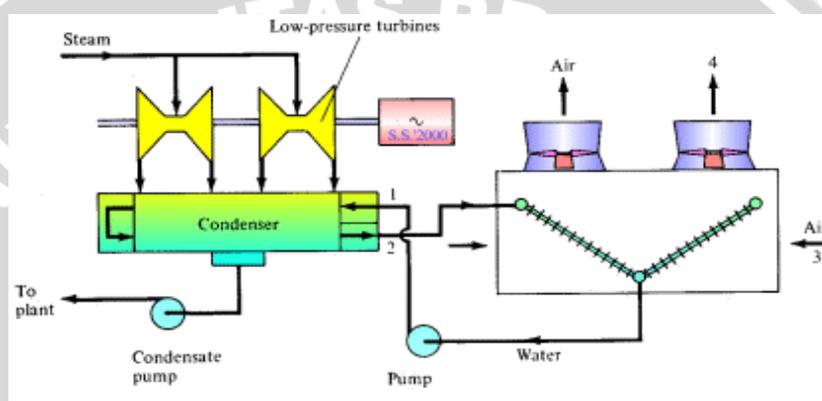
Gambar 2.12. *Direct dry-cooling tower*
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.15)

2. *Indirect dry-cooling tower*

Indirect dry-cooling tower dapat dibagi menjadi dua jenis lagi, yaitu:

- a. *Indirect dry-cooling tower* dengan menggunakan kondensor permukaan konvensional.

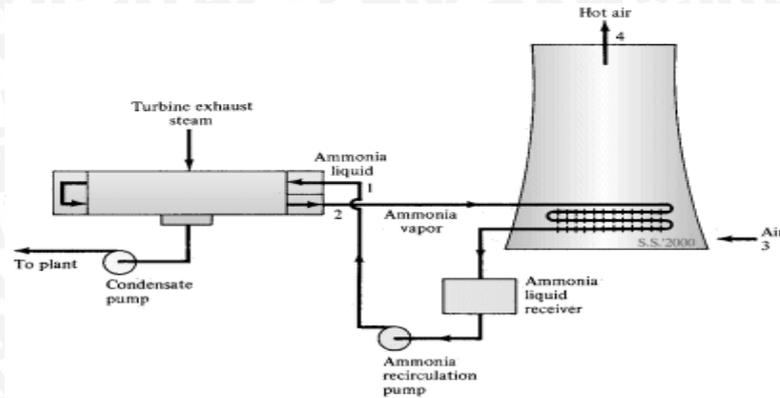
Air sirkulasi yang keluar dari kondensor masuk melalui tabung bersirip dan didinginkan oleh udara atmosfer di dalam menara. *Tower* ini boleh menggunakan jujut jenis alami seperti pada gambar. Operasi kondensor pada jenis ini harus dilakukan pada tekanan 0,17 sampai 0,27 kPa. Pada jenis ini, digunakan kondensor terbuka atau kondensor jet. Kondensat jatuh ke dasar kondensor dan dari situ dipompakan oleh pompa resirkulasi ke kumparan bersirip pada *tower*, yang kemudian didinginkan dan dikembalikan ke kondensor.



Gambar 2.13. Skematik instalasi *Indirect dry-cooling tower* dengan menggunakan kondensor permukaan konvensional
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.16)

- b. *Indirect dry-cooling tower* dengan sirkulasi bahan pendingin 2 fase

Cooling tower ini tidak menggunakan air pendingin, tetapi menggunakan suatu bahan pendingin, seperti dengan menggunakan amoniak sebagai bahan perpindahan kalor antara uap dan air, sehingga perpindahan kalor dapat terjadi dengan perubahan fasa, yaitu pendidihan di dalam tabung kondensor dan kondensasi di dalam tabung menara. Amoniak cair yang hampir jenuh masuk kondensor permukaan dan diuapkan menjadi uap jenuh dan uap jenuh tersebut dipompakan lagi ke kondensor. Pendidihan dan kondensasi ini mempunyai koefisien perpindahan kalor yang lebih tinggi daripada sisi tabung, sehingga menghasilkan beda suhu yang lebih rendah antara uap dan amoniak dan antara amoniak dan udara.



Gambar 2.14. Skematik instalasi *Indirect dry-cooling tower* dengan sirkulasi bahan pendingin 2 fase

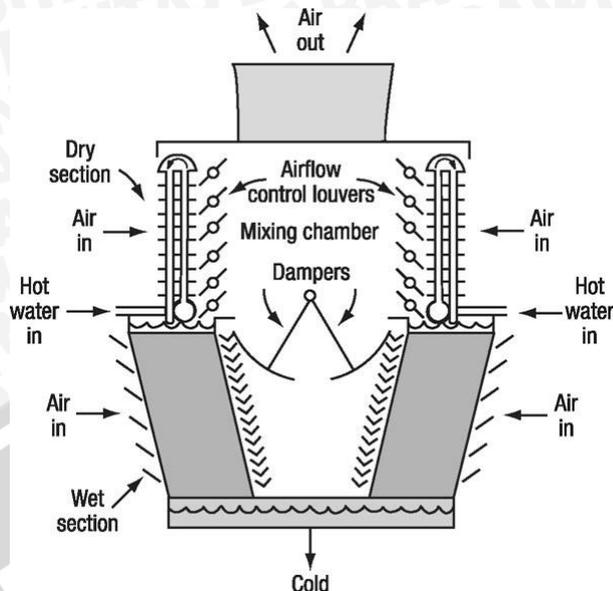
Sumber :Bitstream USU ChapterII (hal.17)

c. *Wet-Dry Cooling Tower*

Wet-dry cooling tower merupakan gabungan antara *wet cooling tower* dan *dry cooling tower*. *Cooling tower* ini mempunyai dua jalur udara paralel dan dua jalur udara seri. Bagian atas *tower* di bawah kipas adalah bagian kering yang berisi tabung-tabung bersirip. Bagian bawah adalah ruang yang lebar yang merupakan bagian yang basah yang terdiri dari bahan pengisi (*filling material*). Air sirkulasi yang panas masuk melalui kepala yang terletak di tengah. Air mula-mula mengalir naik-turun melalui tabung bersirip di bagian kering, kemudian meninggalkan bagian kering dan jatuh ke isian di bagian basah menuju bak penampung air dingin. Sedangkan udara ditarik dalam dua arus melalui bagian kering dan basah. Kedua arus menyatu dan bercampur di dalam *tower* sebelum keluar. Oleh karena arus pertama dipanaskan secara kering dan keluar dalam keadaan yang kering (kelembaban relatif rendah) daripada udara sekitar, sedangkan arus kedua biasanya jenuh.

Wet-dry cooling tower mempunyai keunggulan:

1. Udara keluar tidak jenuh sehingga mempunyai keputihan yang lebih sedikit
2. Karena airnya mengalami pendinginan awal di bagian kering, penyusutan karena penguapan jauh berkurang, demikian juga dengan kebutuhan air tambahan.



Gambar 2.15. *Wet-dry cooling tower*

Sumber: Bitstream USU Chapter II (hal.18)

Setiap jenis dari *cooling tower* tersebut terdiri dari dua macam arah aliran, yaitu *crossflow* (aliran silang) dan *counterflow* (aliran berlawanan). Keuntungan dan kerugian dari masing-masing jenis ini adalah sebagai berikut:

1. Keuntungan *Crossflow*:

- a. Head yang dibutuhkan dari pompa rendah
- b. Biaya operasi dan konsumsi energi rendah
- c. Perawatan mudah
- d. *Static pressure drop* yang rendah

Kerugian *Crossflow* :

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

2. Keuntungan *Counterflow* :

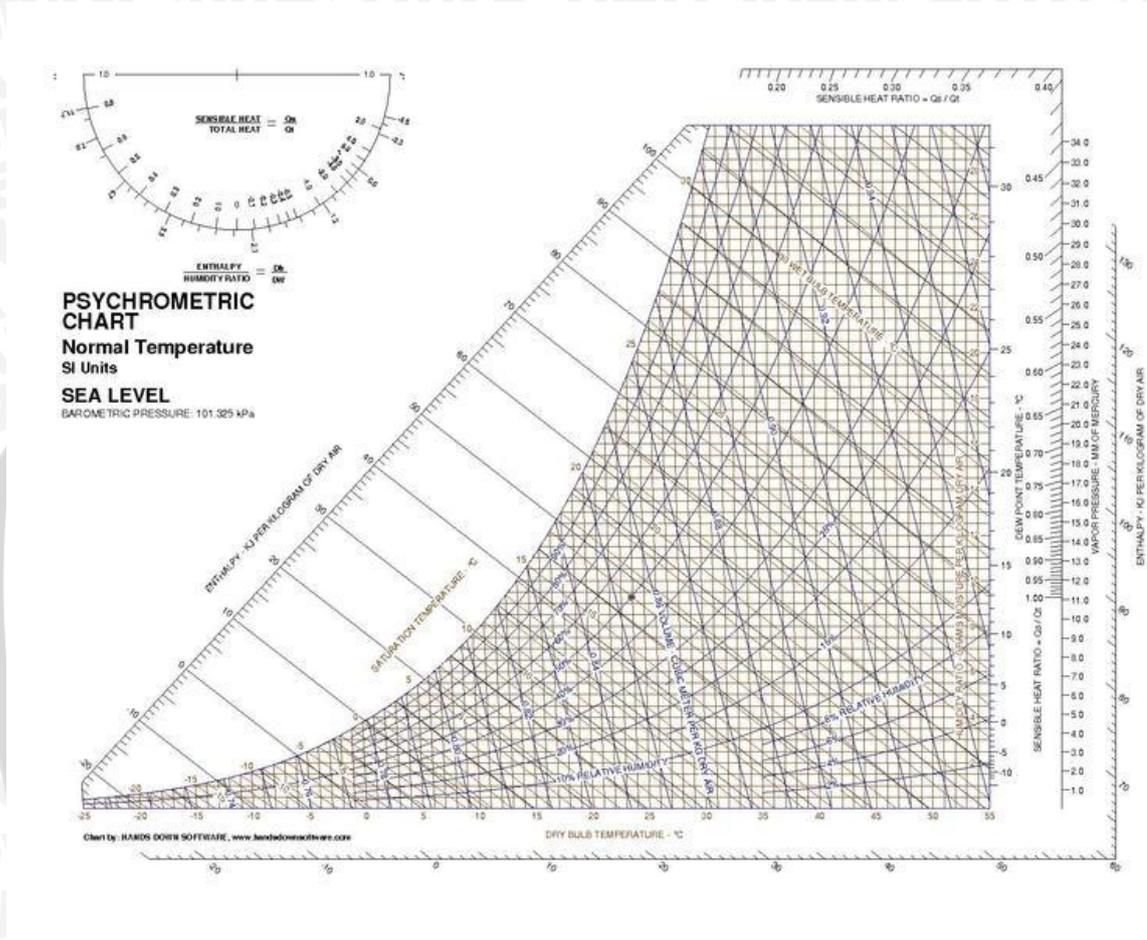
- a. *Range* yang dihasilkan lebih besar
- b. *Approach* lebih kecil
- c. Udara yang digunakan lebih efisien
- d. Pergerakan udara vertical membuat performameningkat

Kerugian *Counterflow* :

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

2.3 Istilah - Istilah Yang Digunakan dalam *Cooling Tower*

Beberapa persamaan yang sering dipakai dalam perhitungan perpindahan kalor dalam *cooling tower* berasal dari diagram psikometri seperti yang ditunjukkan gambar dibawah.



Gambar 2.16 : Diagram *Psychrometric*
Sumber : Notes Of Technology (13 oktober 2010)

Psikometri (*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 pendinginan udara.

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

a. Kelembaban relatif (ϕ)

Kelembaban relatif didefinisikan sebagai perbandingan fraksi molekul uap air di dalam udara basah terhadap fraksi molekul uap air jenuh pada suhu dan tekanan yang sama. Rumusan dituliskan sebagai berikut:

$$\phi = \frac{\text{Tekanan uap air parsial}}{\text{Tekanan jenuh air murni pada suhu yang sama}} \quad (\text{Stoecker, 1996:40}) \quad (2-1)$$

Dengan:

ϕ = Kelembaban relative

Untuk mengukur tekanan uap air parsial dalam udara adalah dengan menggunakan psychrometer. Dimana pada alat ini terdiri dari dua buah thermometer yaitu thermometer bola basah dan bola kering.

Kelembaban relatif juga dapat dicari dari diagram psikrometri dengan mengetahui terlebih dahulu temperatur bola kering dan temperatur bola basah suatu udara. Dimana dari gambar 2.16 nilai temperatur bola kering ditunjukkan oleh sumbu x dan nilai temperatur bola basah ditunjukkan oleh garis melengkung dengan linier menyilang sumbu y.

b. Kelembaban absolut (W)

Kelembaban absolut adalah berat atau massa air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Persamaan kelembaban adalah sebagai berikut:

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

Dengan:

W = Kelembaban absolut [kg uap air/kg udara kering]

P_t = tekanan atmosferik [101,3kPa]

p_s = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [kPa]

dimana, $p_s = \phi \times$ Tekanan uap air untuk udara jenuh (p_g) didapat dari Tabel A-1 pada lampiran [kPa]

Dengan:

ϕ = Kelembaban relatif

c. Volume spesifik (v)

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:

$$v = \frac{R_a T}{P_{atm} - P_s} \dots \dots (Stoecker, 1996:43) \quad (2-3)$$

Dengan:

v = volume spesifik [m^3/kg]

R_a = tetapan gas untuk udara kering = 287 [J/kg.K]

p_t = tekanan atmosferik [101,3kPa]

p_s = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [kPa]

Nilai volume spesifik (v) juga bisa didapatkan dari Tabel A-2 Lembab Udara: sifat sifat termodinamik udara jenuh pada tekanan atmosfer pada lampiran 2.

d. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menyatakan kesetimbangan massa fluida yang *steady* dalam suatu saluran. Dalam *cooling tower* digunakan untuk menghitung laju aliran udara lembab masuk ($m_{moist\ in}$).

$$\rho \cdot v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 – 114}) \quad (2-4)$$

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

$$Q = v \cdot A = \text{konstan} \quad (\text{Fox dan McDonald, 1994 – 114}) \quad (2-5)$$

Dengan:

ρ = massa jenis [kg/m^3]

v = kecepatan fluida [m/s]

A = luas penampang saluran [m^2]

Dimana, $\rho = 1/v$

Dengan:

v = volume spesifik [m^3/kg]

e. Entalpi (h)

Entalpi adalah istilah dalam termodinamika 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.

$$h = c_p \times T + W \times h_g \quad \dots \dots \text{(Stoecker, 1996:42)} \quad (2-6)$$

Dengan:

h = entalpi campuran udara kering dan uap air, [kJ.kg⁻¹]

c_p = kalor spesifik udara kering pada tekanan konstan = 1,0 [kJ.kg⁻¹.K⁻¹]

T = suhu campuran udara dan uap, [K]

h_g = entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara- uap, [kJ.kg⁻¹]

W = Kelembaban absolut

Nilai entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara – uap (h_g) bisa didapatkan dari tabel A-1 (sifat – sifat udara dan uap jenuh) dan A-2 (lembab udara) pada lampiran.

f. 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 atau dipertahankan dalam kondisi basah. Sedangkan temperatur *dew point* adalah temperatur saat uap air di atmosfer mulai mengembun.

2.4 Unjuk Kerja *Cooling Tower*

1. Laju perpindahan kalor (q)

Secara umum besarnya perpindahan kalor dapat dinyatakan menurut hukum Newton tentang pendinginan sebagai berikut:

$$q = U \cdot A(\Delta T) \quad [\text{W}] \quad \text{(Holman, 1994 :490)} \quad (2-7)$$

dimana:

U = koefisien perpindahan kalor [W/m².°C].

A = luas permukaan perpindahan kalor [m^2].

ΔT = selisih suhu fluida masuk dan fluida keluar [$^{\circ}C$].

Besarnya laju perpindahan kalor yang dilepas oleh air bisa juga didapatkan dari penjumlahan kalor yang dilepas oleh air saat masuk *cooling tower* dikurangi nilai kalor yang dilepas air saat keluar *cooling tower*. Dimana hal ini didasarkan pada hukum kesetimbangan energi.

$$q = (m_{w \text{ in}} \cdot h_g) - (m_{w \text{ out}} \cdot h_g)$$

dimana:

$m_{w \text{ in}}$ = Laju aliran air masuk [kg/s]

$m_{w \text{ out}}$ = Laju aliran air keluar [kg/s]

h_g = entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara- uap, [$kJ \cdot kg^{-1}$]

2. Efektivitas *cooling tower* (ϵ)

Efektivitas *cooling tower* adalah kemampuan untuk melepas kalor secara aktual dibandingkan dengan kalor maksimum yang dilepas secara teoritis. Perpindahan kalor aktual dapat dihitung dari perubahan suhu aktual yaitu selisih suhu fluida panas masuk ($T_{W \text{ in}}$) dan keluar ($T_{W \text{ out}}$) sebesar $\Delta T_{\text{act}} = T_{W \text{ in}} - T_{W \text{ out}}$. Besarnya laju perpindahan kalor actual yang dilepas oleh air bisa juga didapatkan dari penjumlahan kalor yang dilepas oleh air saat masuk *cooling tower* ($m_{w \text{ in}} \cdot h_g$) dikurangi nilai kalor yang dilepas air saat keluar *cooling tower* ($m_{w \text{ out}} \cdot h_g$).

Sedangkan perpindahan kalor maksimum diperoleh jika salah satu fluida mengalami perubahan suhu sebesar beda suhu maksimum yaitu selisih suhu fluida panas masuk ($T_{W \text{ in}}$) dan fluida dingin masuk ($T_{a \text{ W in}}$) sebesar $\Delta T_{\text{max}} = T_{W \text{ i}} - T_{a \text{ W i}}$. Kalor maksimum yang mungkin dilepas *cooling tower* akan mencapai maksimum bila temperatur air keluar ($T_{W \text{ out}}$) sama dengan temperatur bola basah udara masuk. Dengan demikian efektivitas alat penukar kalor dirumuskan dengan:

$$\epsilon = \frac{q_{\text{out}}}{q_{\text{max}}} \quad (\text{Holman, 1994: 498}) \quad (2-8)$$

atau,

$$\epsilon = \frac{(m_{w \text{ in}} \cdot h_{g \text{ in}}) - (m_{w \text{ out}} \cdot h_{g \text{ out}})}{(m_{w \text{ in}} \cdot h_{g \text{ in}}) - (m_{w \text{ out}} \cdot h_{g \text{ wb}})}$$

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 (1996:346), $\frac{h_c A}{C_{pm}}$ dapat didefinisikan dalam istilah lain yaitu *NTU* (*Number of Transfer Unit*). Secara umum *NTU* untuk sebuah *cooling tower* dirumuskan dengan:

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

Dengan :

U = koefisien perpindahan kalor konveksi [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$].

A = luas permukaan perpindahan kalor [m^2]

\dot{m} = Laju aliran massa [kg/s]

c_p = kalor spesifik udara kering pada tekanan konstan [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]

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

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

Dimana $m^* = \frac{M_{\text{moist in}}}{M_{\text{moist out}}} \cdot \frac{C_s}{C_p}$

Dengan $M_{\text{moist in}}$ = laju aliran udara lembab masuk.

$M_{\text{moist out}}$ = laju aliran udara lembab keluar.

m^* = laju massa alir kritis.

C_s merupakan kalor spesifik standar yaitu perbandingan Δh dengan ΔT aktual

$$C_s = \frac{h_{g \text{ in}} - h_{g \text{ out}}}{T_{w \text{ in}} - T_{w \text{ out}}}$$

C_p merupakan kalor jenis air yaitu $4.184 \text{ J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ atau $4,184 \text{ kJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$.

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

2.5 Hipotesis

Pada nilai debit air yang tetap, semakin besar nilai debit aliran udara yang masuk, maka laju udara akan meningkat sehingga jumlah kalor yang dipindahkan juga semakin besar dan unjuk kerja *cooling tower* akan meningkat.

