

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Bahrul (2012), dengan penelitian pengaruh variasi sudut aliran udara yang keluar dari blower terhadap unjuk kerja *cooling tower*, dalam penelitiannya menyatakan variasi sudut aliran udara dari blower memberikan pengaruh terhadap unjuk kerja *cooling tower*, yaitu berupa laju perpindahan kalor, efektivitas dan Number of Transfer Unit (NTU).

Irfan (2010), dengan penelitian pengaruh pengkondisian udara masuk terhadap unjuk kerja *cooling tower*, dalam penelitiannya menyatakan bahwa semakin tinggi kelembaban relative dan kecepatan udara masuk pada *cooling tower*, maka nilai unjuk kerja pada *cooling tower* juga meningkat.

2.2 Sistem Air Sirkulasi

Fungsi sistem sirkulasi ialah sistem sekunder yang menyediakan air pendingin untuk mendinginkan alat pelepas kalor dan dengan demikian menjadi wahana untuk pembuangan kalor dari siklus uap pada pembangkit daya ke lingkungan. Sistem ini terpisah dari siklus utama yang mana pada umumnya berfungsi untuk mendinginkan kondensor pada turbin.

Sistem air sirkulasi diperlukan untuk membuang kalor ke lingkungan dengan cara yang efisien tetapi juga dengan memenuhi peraturan tentang buangan termal. Fungsinya sangat vital bagi efisiensi instalasi daya secara keseluruhan, karena kondensor yang beroperasi pada suhu yang serendah mungkin akan menghasilkan kerja turbin yang maksimum dan efisiensi yang maksimum, sedang pembuangan kalor minimum. Jadi dengan sistem pembuangan kalor yang baik maka pekerjaan menjadi mudah, artinya kalor yang harus dibuang lebih sedikit dan kebutuhan air pendingin pun lebih kecil.

2.3 Cooling tower

2.3.1 Pengertian

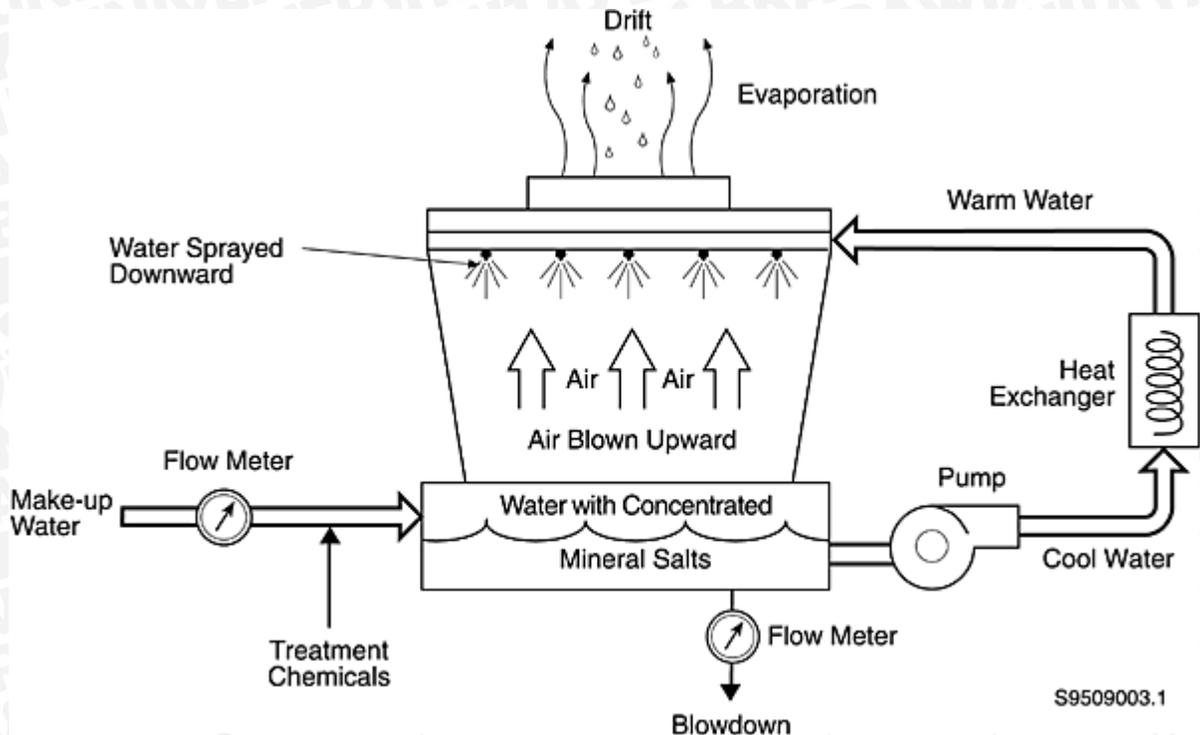
Menara pendingin merupakan suatu alat yang digunakan untuk menurunkan suhu aliran air dengan cara mengekstraksi panas dari air kemudian mengemisikanya ke atmosfer. Menara pendingin menggunakan penguapan, dimana sebagian air diuapkan ke aliran udara yang bergerak dan kemudian dibuang ke atmosfer.

Menurut Swanekamp (1989:2:137), *cooling tower* adalah sebuah alat penukar kalor khusus dimana dua fluida (air dan udara) dikontakkan langsung antara satu dengan yang lainnya untuk memindahkan panas (waste heat) ke atmosfer.

2.3.2 Prinsip Kerja

Air panas yang masuk melalui bagian atas cooling tower didistribusikan secara merata di dalam rumah *cooling tower*, lalu akan jatuh ke bawah dikarenakan gaya gravitasi ataupun pancaran atau semprotan air yang diarahkan ke bawah. Sedangkan udara masuk dari bagian bawah menara dengan cara alami maupun mekanik. Disana akan terjadi perpindahan kalor dan massa, dimana perpindahan kalor dan massa terjadi dari air ke udara. Air dingin yang ditampung di dalam bak penampung akan digunakan kembali.

Dalam proses ini, terjadi kehilangan air karena terjadi penguapan. Sehingga harus diberi masukan air tambahan (*make up water*). Air dingin yang dihasilkan dilewatkan pada saringan agar kotoran-kotoran atau padatan-padatan mineral tertahan dan tidak melewati alat lainnya.



Gambar 2.1. Diagram Skematik Sistem Menara Pendingin.
 Sumber : <http://cooling-tower-online.com/page/1/>

Menurut El-Wakil (1992:260-263) bagian-bagian dari *cooling tower* adalah :

1. Sistem Distribusi Air (*water-distribution system*)

Sistem distribusi air pada *cooling tower* berguna untuk menyalurkan air panas dari kondensor secara merata ke seluruh bagian cooling tower.

Ada bermacam-macam metode distribusi air pada *cooling tower*, yaitu :

a. Gravitasi

Jenis ini banyak digunakan untuk menara-menara yang menggunakan metode aliran silang, dimana terdiri dari pipa penyalur air panas yang mengucurkan air ke bawah melalui orifice. Air jatuh karena adanya gaya gravitasi bumi ke isian dibawahnya.

b. Spray

Umumnya digunakan untuk *cooling tower* jenis aliran berlawanan dan memiliki susunan pipa yang melintang dengan *nozel* yang menyembrot kearah bawah. Untuk menghasilkan semprotan (*spray*), biasanya digunakan *nozel*. Alat ini menyembrotkan

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. *Nozel* dapat dipasang dan menyemprot dengan pola bundar atau segi empat, atau bisa juga menjadi bagian dari rakitan yang berputar seperti pada menara dengan beberapa potongan lintang yang memutar.

c. *Rotary*

Sistem ini mempunyai lengan horizontal yang dapat berputar pada poros vertikal. Air yang disemprotkan bertekanan cukup tinggi dan memiliki sudut yang dapat diatur. Akibat tekanan yang diberikan, timbul gaya reaksi yang mengakibatkan poros vertikal berputar dengan kecepatan yang dapat disesuaikan dengan mengatur sudut pancaran air.

2. Isian (*filler*)

Isian merupakan inti dari menara pendingin. Dalam menara pendingin, air panas didistribusikan diatas media pengisi dan didinginkan melalui penguapan ketika menuruni menara dan bersentuhan dengan udara. 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 plastic, kayu atau logam. Bahan pengisi *film* dipilih untuk penggunaan yang sirkulasi airnya bebas dari sampah yang dapat menghalangi lintasan bahan pengisi. Pada dasarnya ada dua jenis isian yaitu jenis percik (*splash type*) dan jenis film (*film type*).

3. Hanyutan dan pencegah hanyutan (*Drift* dan *Drift Eliminator*)

Hanyutan adalah air yang terbawa oleh arus udara sebagai butir *droplet* yang belum menguap. Hanyutan menyebabkan sebagian air dalam sistem air sirkulasi hilang dan tidak ikut berfungsi dalam pemindahan kalor melalui penguapan. Peristiwa ini dapat diminimalkan dengan menggunakan *drift eliminator* yang berupa sekat-sekat yang dipasang beberapa baris. Sekat tersebut membuat udara terpaksa berubah arah secara tiba-tiba. Momentum dari butir-butir yang berat menyebabkan butir cairan tersebut terpisah dari udara pada waktu menumbuk sekat sehingga membentuk lapisan film air yang kemudian jatuh kembali ke bawah.

4. Air tambahan (*make up water*)

Air tambahan (*make up water*) yang diperlukan oleh menara pendingin ialah jumlah air yang diperlukan untuk penganti penguapan, hanyutan dan bocoran.

5. Kolam air dingin

Kolam air dingin terletak pada atau dekat bagian bawah dari menara dan menerima air yang telah didinginkan dari bagian atas menara. Kolam biasanya memiliki lubang atau titik terendah untuk mengeluarkan air dingin.

2.3.3. Klasifikasi *Cooling Tower*

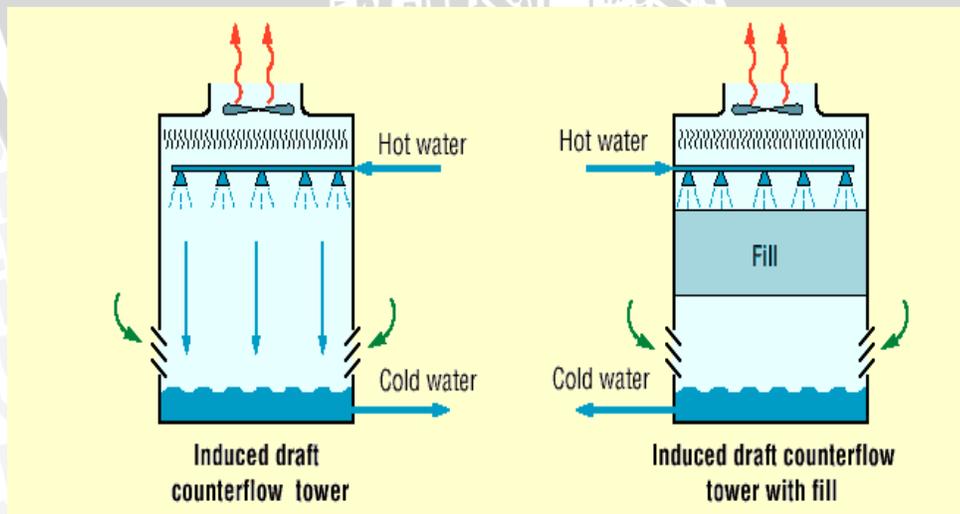
Menurut El-Wakil (1992:251-280) menara pendingin dibagi menjadi tiga yaitu, menara pendingin basah, menara pendingin kering dan menara pendingin basah kering. Menara pendingin basah diklasifikasikan atas menara pendingin jujut mekanik (*mechanical draft*) dan menara jujut alami (*natural draft*).

1. Menara Pendingin Jujut Mekanik (*Mechanical Draft*)

Pada menara ini, udara berpindah karena satu atau beberapa kipas atau *fan* yang digerakkan secara mekanik.

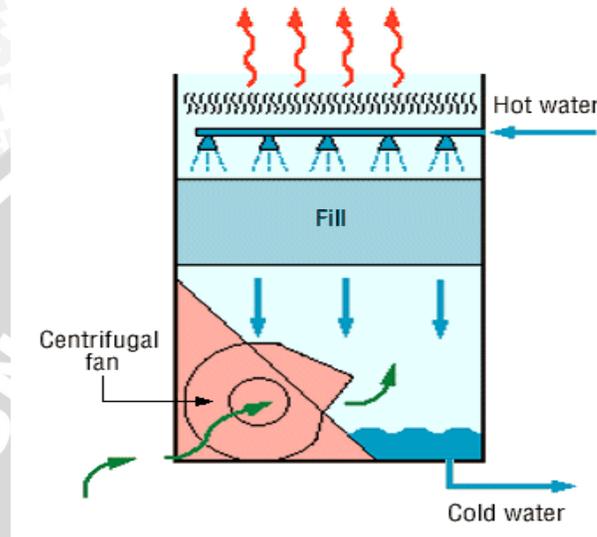
Cooling tower jenis ini dibagi menjadi 2 yaitu :

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



Gambar 2.2. *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/blower yang terletak di bagian bawah dan dikeluarkan melalui atas. Menara pendingin jenis ini secara teoritis lebih disukai karena terjaminnya aliran udara dalam jumlah yang diperlukan pada segala macam kondisi beban dan cuaca.



Gambar 2.3. *Forced draft Cooling tower*.

Sumber : <http://cooling-tower-online.com/page/6/>

Menara jenis *mechanical draft* merupakan menara yang paling banyak dipakai pada saat ini dan yang paling luas dari jenis ini adalah *induced draft tower*. Hal ini disebabkan dalam penggunaannya menara jenis ini lebih menguntungkan dibandingkan dengan yang lain. Pada jenis *forced draft*, udara masuk melalui fan terbuka dan relatif tidak efektif karena menara harus menyediakan ruang udara masuk sehingga memerlukan dimensi menara yang lebih lebar. Distribusi udara relatif buruk, karena udara harus membuat belokan 90^0 pada kecepatan tinggi. Pada menara *induced draft*, udara dapat masuk sepanjang dinding dalam menara dan sebagai konsekuensinya ketinggian menara yang dibutuhkan untuk masuknya udara lebih rendah.

Setiap jenis dari *cooling tower* tersebut terdiri dari dua macam, yaitu *cross flow* (aliran silang) dan *counter flow* (aliran berlawanan). Disebut *cross flow* apabila aliran udara dan aliran air saling bersilangan. Sedangkan bila aliran udara arahnya saling berlawanan disebut *counter flow*. Keuntungan dan kerugian dari aliran *cross flow* sebagai berikut :

- Keuntungan :
- Head yang dibutuhkan dari pompa rendah
 - Biaya operasi dan konsumsi energi rendah
 - Perawatan mudah
 - Static pressure drop* yang rendah
- Kerugian :
- Head rendah dapat mengakibatkan *clogging* (tersumbat)
 - Peristiwa *Icing* (menjadi Kristal-kristal es) yang sulit dikontrol

2.4 Parameter Yang Digunakan dalam *Cooling Tower*

Dalam pembahasan *cooling tower* ada beberapa parameter yang digunakan, yaitu :

1. Psikrometri dan diagram psikrometri

Psychrometri merupakan analisis tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air, yang mempunyai arti penting dalam bidang teknik pengkondisian udara, karena udara atmosfer tidak kering betul tetapi campuran antara udara dan uap air.

Diagram psikrometri menggambarkan beberapa sifat penting dari udara kering hingga lembab, baik harga entalpi, kelembaban dan volume spesifik dari suatu sampel udara.

2. Kelembaban relatif (Φ)

Kelembaban relatif adalah perbandingan tekanan parsial uap air di udara dengan tekanan parsial uap air jenuh pada suhu yang sama. Kelembaban ini biasanya dinyatakan dalam persen di mana kelembaban 0 % merupakan udara kering, sedangkan 100 % adalah udara jenuh. Rumusan dituliskan sebagai berikut

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

Dimana:

ϕ = kelembaban relatif (%)

p_s = tekanan parsial uap air di atmosfer (Pa)

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

Kelembaban relatif juga dapat dicari dengan menggunakan diagram psikrometri. Dengan mengetahui nilai temperatur bola kering dan bola basah suatu sampel udara maka dapat diketahui harga kelembaban relatif.

3. Rasio kelembaban (humidity ratio)

Kelembaban absolut atau rasio kelembaban adalah perbandingan massa uap air dengan massa udara kering dalam udara atmosfer, atau dapat pula didefinisikan sebagai massa uap air yang terkandung dalam setiap kilogram udara kering. Sehingga dapat dinyatakan :

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Karena uap air dan udara dapat dianggap sebagai gas ideal,

$$\omega = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_v / R_v}{p_a / R_a} = \frac{p_v R_a}{p_a R_v} = \frac{p_v R_a}{(p - p_v) R_v}$$

Dengan harga $R_a = 287 \text{ J/Kg.K}$ dan $R_v = 461,5 \text{ J/Kg.K}$, diperoleh

$$\omega = \frac{p_v \cdot 287}{(p - p_v) \cdot 461,5}$$

$$\omega = 0,622 \frac{p_v}{(p - p_v)} \dots (\text{Stoecker, 1996 : 41})$$

dimana :

ω = kelembaban absolut [kg uap air/kg udara kering]

V = volume campuran udara-uap [m^3]

p = tekanan atmosferik

p_a = tekanan parsial udara kering [Pa]

p_v = tekanan parsial uap air dalam keadaan jenuh [Pa]

T = suhu mutlak campuran udara-uap [K]

R_v = tetapan gas untuk uap air [J/kg.K]

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

4. Temperatur bola kering (dry bulb)

Temperatur bola kering (dry bulb) adalah temperatur dari termometer yang sensornya terbuka ke atmosfer (sensor kering dan terbuka), namun penunjukannya tidak tepat karena adanya pengaruh radiasi panas.

5. Temperatur bola basah (wet bulb)

Temperatur bola basah adalah temperatur yang sensornya dibalut dengan kain basah untuk menghilangkan pengaruh radiasi panas dan pada sensor harus terjadi aliran udara sekurang-kurangnya 5 m/s. Temperatur bola basah kadang-kadang dinamai temperatur jenuh adiabatik.

6. Entalpi

Entalpi adalah energi kalor yang dimiliki suatu zat pada suatu temperatur tertentu. Entalpi campuran udara kering dan uap air adalah jumlah dari entalpi udara kering dan entalpi uap air.

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

dimana :

h = entalpi campuran udara kering dan uap air, (kJ/kg)

c_p = kalor spesifik udara kering pada tekanan konstan = 1,0 (kJ/kg.K)

T = suhu campuran udara dan uap, (K)

h_g = entalpi uap air jenuh pada suhu campuran udara dan uap, (kJ/kg)

7. 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 adalah

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

Dimana:

v = volume spesifik (m³/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)

T = temperatur gas (K)

8. Konduktivitas thermal (k)

Konduktivitas thermal atau keterhantaran thermal (k) adalah suatu besaran intensif bahan yang menunjukkan kemampuannya untuk menghantarkan panas. Setiap bahan memiliki nilai konduktivitas thermal yang berbeda.

9. Keseimbangan energi dan massa

a. 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 :

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

dimana:

p = tekanan fluida [Pa]

ρ = massa jenis fluida [kg/m³]

v = kecepatan fluida [m/s]

g = percepatan gravitasi [m/s²]

z = beda elevasi [m]

b. Persamaan Kontinuitas

Persamaan kontinuitas menyatakan keseimbangan massa fluida yang *steady* dalam saluran dengan kecepatan v [m/s] dan luas penampang saluran A[m²], dan dituliskan :

$$\rho \cdot v \cdot A = \text{konstan} \quad \dots \text{ (Fox dan McDonald, 1994 : 114)}$$

untuk fluida inkompresible, harga ρ konstan sepanjang saluran, sehingga persamaan ini banyak dinyatakan dengan kapasitas Q [m³/s]

$$Q = v \cdot A = \text{konstan} \quad \dots \text{ (Fox dan McDonald, 1994 : 114)}$$

2.5 Karakteristik *Cooling Tower*

1. Laju Perpindahan kalor (q)

Pada *cooling tower* terjadi perpindahan panas secara langsung (*direct contact*). Air panas berkontak langsung dengan udara untuk mentransfer kalor dari air ke udara.

Pada *cooling tower* terjadi perpindahan kalor konveksi paksa, karena air didinginkan dengan udara yang dihembuskan oleh bantuan kerja *blower*. Secara umum besarnya perpindahan kalor secara konveksi dapat dinyatakan sebagai berikut:

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

dimana :

\dot{m} = laju massa aliran

C_p = kalor spesifik

ΔT = Selisih antara air masuk dan air keluar *cooling tower*

atau

$$q = U \cdot A \Delta T_{lm} \text{ [W]} \quad \dots \text{ (Holman, 1994 : 490)}$$

dimana :

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

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

ΔT_{lm} = beda suhu rata-rata [$^\circ\text{C}$].

2. Efektivitas *cooling tower*

Efektivitas (*Effectiveness*) suatu alat penukar kalor adalah kemampuan untuk melepas kalor secara aktual dibandingkan dengan kalor maksimum yang mungkin dilepas. Perpindahan kalor aktual dapat dihitung dari perubahan suhu aktual yaitu selisih suhu fluida panas masuk (T_{hi}) dan keluar (T_{ho}) sebesar $\Delta T_{act} = T_{hi} - T_{ho}$. Sedangkan perpindahan kalor maksimum diperoleh jika salah satu fluida mengalami perubahan suhu sebesar beda suhu maksimum yaitu selisih suhu fluida panas masuk (T_{hi}) dan fluida dingin masuk (T_{ci}) sebesar $\Delta T_{max} = T_{hi} - T_{ci}$

Dengan demikian efektivitas alat penukar kalor dirumuskan dengan :

$$\varepsilon = \frac{q_{out}}{q_{max}} \quad \dots(\text{Holman, 1994 : 499})$$

atau

$$\varepsilon = \frac{Thi - Tho}{Thi - Tc1} \quad \dots(\text{Holman, 1994 : 499})$$

Thi = Temperatur fluida panas masuk ($^{\circ}\text{C}$)

Tho = Temperatur fluida panas keluar ($^{\circ}\text{C}$)

Tc1 = Temperatur fluida dingin masuk ($^{\circ}\text{C}$)

2. Number Transfer Unit (NTU)

Number of transfer unit adalah fungsi dari angka tak berdimensi dalam alat penukar kalor yang didefinisikan sebagai perbandingan antara koefisien perpindahan kalor menyeluruh dikalikan luas permukaan alat penukar kalor keseluruhan terhadap kapasitas minimum.

Secara umum untuk sebuah *cooling tower* dirumuskan dengan

$$NTU = \frac{U.A}{(\dot{m} \cdot Cp)_{min}} \quad \dots(\text{Holman, 1994:507})$$

Dimana :

U = koefisien perpindahan kalor menyeluruh ($\text{Watt/m}^2 \text{K}$)

A = luas permukaan perpindahan kalor (m^2)

\dot{m} = laju massa aliran (kg/s)

Cp = panas jenis ($\text{kJ/kg } ^{\circ}\text{C}$)

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

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

$$\text{Dimana } m^* = \frac{\dot{m}a}{\dot{m}w} \cdot \frac{Cs}{Cpw}$$

Dengan $\dot{m}a$ = laju aliran udara lembab masuk (kg/s)

$\dot{m}w$ = laju aliran udara lembab keluar (kg/s)

C_s merupakan kalor spesifik standar yaitu perbandingan Δh dengan ΔT aktual

$$C_s = \frac{hw_{in} - hw_{out}}{T_{wi} - T_{wo}}$$

Dimana,

hw_{in} = entalpi air masuk (kJ/Kg)

hw_{out} = entalpi air keluar (kJ/Kg)

T_{wi} = temperatur air masuk ($^{\circ}\text{C}$)

T_{wo} = temperatur air keluar ($^{\circ}\text{C}$)

2.6 Bilangan Reynolds dan Bilangan Nusselt

Fluida yang mengalir memiliki suatu pola aliran. Pola aliran tersebut adalah pola laminar yang bergerak secara teratur dan pola turbulen yang bergerak tidak teratur dan acak. Proses perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen dipengaruhi oleh geometri, kekasaran, kecepatan, temperatur permukaan dan tipe fluida yang mengalir .

Untuk menentukan jenis aliran maupun tingkat turbulensinya, dapat dilihat dari besarnya perbandingan antara gaya inersia (*inertia force*) dengan gaya viskos (*viscous force*) pada fluida. Perbandingan ini disebut dengan bilangan Reynolds yang juga merupakan parameter tanpa dimensi, dimana untuk aliran eksternal dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} \quad \dots\dots(\text{Cengel, 1998 : 352})$$

$$= \frac{\rho V^2 / \delta}{\mu V / \delta^2}$$

$$= \frac{\rho V \delta}{\mu}$$

$$= \frac{V \delta}{\nu}$$

Dimana

V = kecepatan aliran bebas (m/s)

δ = panjang karakteristik dari geometris (m)

$\nu = \mu/\rho$ = viskositas kinematik fluida (m^2/s)

viskositas kinematik adalah perbandingan antara viskositas dinamik μ dengan massa jenis fluida ρ

Pada bilangan Reynolds yang besar, gaya inersia jauh lebih besar dibandingkan dengan gaya viskos-nya, sehingga gaya viskos ini tidak mampu menahan gerakan acak dan fluktuasi aliran yang cepat, dengan demikian terjadi aliran turbulen. Sedangkan pada bilangan Reynolds rendah, gaya viskos mampu menahan fluktuasi aliran sehingga tetap terjaga dalam bentuk berlapis-lapis pada arahnya masing-masing atau laminar

Hubungan antara bilangan reynolds dan bilangan nusselt menurut Cengel (1998-357) dituliskan sebagai berikut:

$$Nu = \frac{hL}{k} = C Re_L^m Pr^n \dots (\text{Holman, 1994 : 253})$$

C , m dan n merupakan konstanta yang diperoleh dari hasil eksperimen dan nilainya berbeda pada tiap-tiap kasus. Dengan demikian berdasarkan dua rumusan diatas, tampak bahwa dengan meningkatnya bilangan Reynolds akan memperbesar bilangan Nusselt yang mengakibatkan perpindahan kalor konveksi semakin efektif.

2.7 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 karakteristik *cooling tower tipe cross flow* juga semakin besar.