

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Macam-Macam Tipe *Cooling Tower*

*Cooling Tower* merupakan peralatan penukar panas yang memanfaatkan kontak langsung antara air dan udara untuk menurunkan temperatur air melalui proses perpindahan panas *sensible* dan panas laten (evaporasi). Berdasarkan mekanisme penggerak udara dan prinsip aliran, *Cooling Tower* dapat diklasifikasikan menjadi beberapa tipe sebagai berikut.

##### a. *Natural Draft Cooling Tower*

*Natural draft Cooling Tower* bekerja dengan memanfaatkan efek cerobong (*chimney effect*), yakni perbedaan densitas antara udara hangat/lembap di dalam menara dan udara lingkungan yang lebih sejuk. Perbedaan densitas ini menimbulkan aliran udara alami dari bawah ke atas tanpa bantuan *fan*. Tipe ini umumnya berukuran besar dan digunakan pada pembangkit listrik atau fasilitas proses berskala besar karena mampu mengalirkan udara dalam jumlah besar dengan konsumsi energi operasi yang sangat rendah. Namun, *natural draft* kurang fleksibel terhadap variasi beban dan kondisi lingkungan tertentu (Patel & Sharma, 2023).

##### b. *Induced Draft Cooling Tower*

Pada tipe ini, *fan* ditempatkan di bagian atas sehingga menarik udara melalui sistem menara. Udara masuk dari sisi samping dan keluar melalui bagian atas. Desain *Induced Draft* banyak digunakan di industri karena:

- Menghasilkan distribusi udara yang stabil,
- Memiliki efisiensi pendinginan tinggi,
- Risiko *recirculation* lebih kecil dibanding *forced draft*.

Tipe *Cooling Tower* pada *plant Petrochemical* yang menjadi objek penelitian termasuk kategori *Induced Draft*, sehingga pembahasan teori pada penelitian ini difokuskan pada tipe tersebut (Patel & Sharma, 2023).

### c. *Fan Assisted Natural Draft Cooling Tower*

Pada kondisi suhu lingkungan tinggi atau keterbatasan lahan/tinggi menara, aliran udara alami sering tidak cukup untuk mencapai kinerja pendinginan yang ditargetkan. Untuk itu digunakan bantuan *fan* yang ditempatkan pada area masuk/keluar udara guna menguatkan efek cerobong dan mengatur debit udara secara adaptif. Tipe *fan-assisted natural draft* ini memadukan keunggulan menara *natural draft* dan *mechanical draft*, tetap hemat daya karena *natural draft* bekerja sepanjang waktu, namun memiliki fleksibilitas operasi berkat *fan* yang dapat dinaik-turunkan kecepatannya atau dimatikan sesuai kebutuhan musiman/beban. Di sisi lain, konfigurasi ini memerlukan perawatan berkala pada komponen mekanik (*fan*, *gear*, sistem kelistrikan, serta distribusi air), namun memberi kompensasi berupa tinggi menara yang dapat dikurangi, karakteristik pendinginan musim panas yang lebih baik, risiko resirkulasi yang rendah, dan kemampuan tetap mendinginkan saat darurat kelistrikan karena aliran alami masih bekerja. (Patel & Sharma, 2023)

## 2.2 Macam-Macam Tipe *Filler*

*Filler* (media pengisi) merupakan komponen penting untuk meningkatkan luas kontak antara air dan udara. *Filler* modern umumnya menggunakan material PVC atau PP dengan berbagai konfigurasi permukaan untuk mengatur turbulensi, pola aliran, dan minimisasi *fouling*.

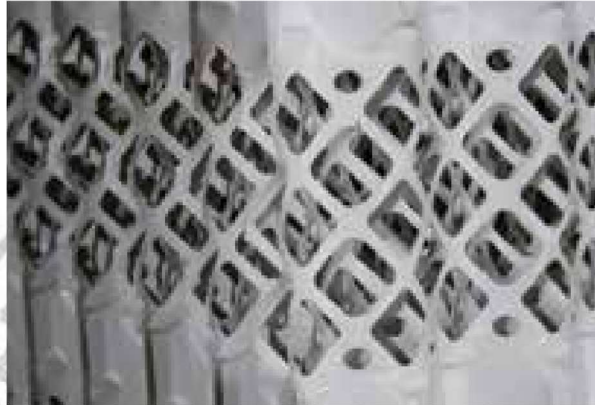
### a. *Golden Grids*



**Gambar 2.1** *Golden Grid* (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *Golden Grid* pada Gambar 2.1 ini cocok untuk kualitas air sangat buruk, termasuk air laut. Struktur berupa nampan yang digantung dengan kawat SS316 memberikan ketahanan korosi tinggi, cocok untuk air dengan tingkat pengotor tinggi (Hamon, 2020).

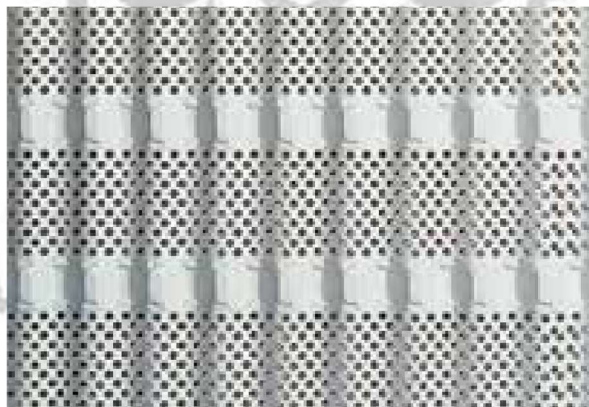
**b. *Tricklefill***



**Gambar 2.2** *Tricklefill* (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *Tricklefill* pada Gambar 2.2 dirancang dengan jarak lembaran yang lebar dan lubang besar untuk mengurangi *scaling* dan *fouling*. Lubang-lubang besar menciptakan turbulensi yang meningkatkan perpindahan panas. Material dapat berupa PVC atau PP (Hamon, 2020).

**c. *Coolfree***



**Gambar 2.3** *Coolfree* (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *Coolfree* pada Gambar 2.3 termasuk tipe *film* dengan pengotoran rendah namun tetap mempertahankan performa termal yang baik. Direkomendasikan untuk air yang sangat buruk atau tidak memiliki perawatan kimia yang memadai (Hamon, 2020).

**d. *Cleanflow***



**Gambar 2.4 *Cleanflow*** (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *cleanflow* pada Gambar 2.4 menggunakan teknologi *non-contact sheets* dengan *horizontal corrugations* yang memaksimalkan distribusi air dan meminimalkan deposit padatan. *Filler* ini cocok untuk air berkualitas rendah, termasuk air laut. Digunakan sebagai *filler* eksisting pada *Cooling Tower plant* yang akan diteliti (Hamon, 2020).

**e. *Cleanflow plus***



**Gambar 2.5 *Cleanflow plus*** (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *cleanflow plus* pada Gambar 2.5 merupakan generasi lanjutan dengan peningkatan signifikan pada luas permukaan perpindahan panas ( $140,7 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) dibanding *cleanflow* ( $127 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ). Menggunakan kombinasi permukaan *waved* dan *flat corrugated* yang meningkatkan turbulensi air dan udara, memperluas area kontak, serta menurunkan *pressure drop*. Dirancang untuk kondisi air industri berat seperti air laut. *Filler* ini dipilih sebagai alternatif dalam penelitian ini (Hamon, 2020).



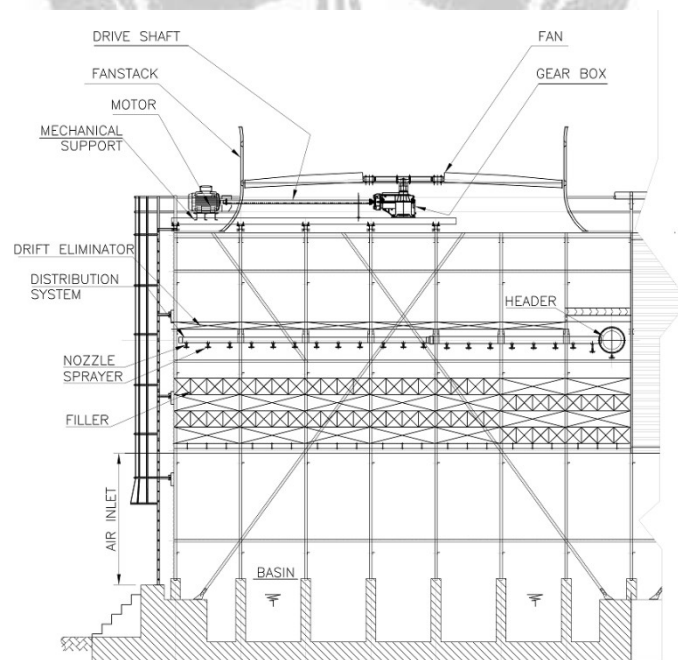
#### f. *Coolfilm*



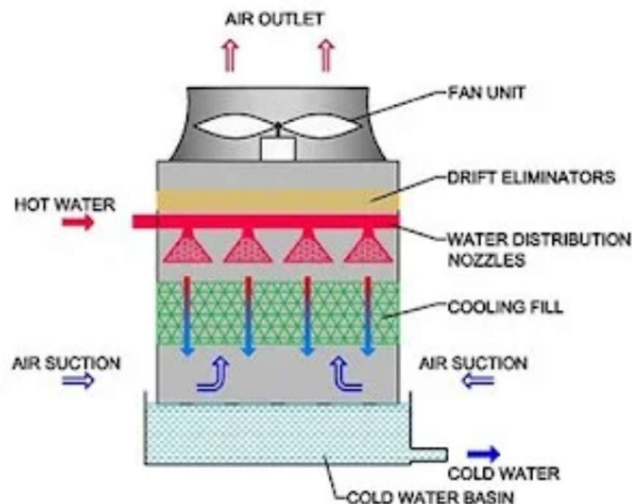
**Gambar 2.6** *Coolfilm* (Hamon, 2020)

*Filler* tipe *coolfilm* pada Gambar 2.6 memiliki performa tinggi untuk *Cooling Tower* dengan air yang relatif lebih bersih karena sensitif terhadap *fouling*. Direkomendasikan ketika efisiensi termal menjadi prioritas utama (Hamon, 2020).

### 2.3 Bagian-Bagian *Induced Draft Cooling Tower*



**Gambar 2.7** Komponen *Cooling Tower* (Hamon, 2024)



**Gambar 2.8** Cara kerja *Cooling Tower* (<https://bapcoolingtower.id//>, 2025)

Gambar 2.7 menjelaskan tentang bagian-bagian *Cooling Tower* serta Gambar 2.8 adalah visualisasi cara kerjanya, bagian paling atas *Cooling Tower* terdapat *fan stack*, yang berfungsi mengarahkan aliran udara secara efisien ke luar menara sehingga meningkatkan sirkulasi udara dan mendukung proses pendinginan. Di bawahnya terdapat *fan* yang menggerakkan udara melewati struktur *Cooling Tower* untuk mempercepat perpindahan panas dari air panas ke udara. *Fan* ini digerakkan oleh *motor* yang terhubung ke poros (*shaft*) melalui *gearbox*, yang berfungsi menurunkan putaran motor (RPM) agar sesuai dengan kebutuhan operasi *fan*.

*Mechanical support* berfungsi menopang seluruh komponen mekanikal di dalam sistem. *Header pipe* merupakan pipa utama yang membawa air panas dari proses dan mendistribusikannya ke sistem distribusi air. Selanjutnya, air panas disemprotkan ke area *filler* melalui *nozzle sprayer* agar tersebar merata di atas media pendingin.

*Filler* berperan memperluas permukaan kontak antara air dan udara, yang sangat penting bagi proses perpindahan panas. Dengan memecah aliran air menjadi tetesan-tetesan kecil atau membentuk lapisan *film* air, *filler* memperlambat aliran air dan memberikan waktu lebih lama untuk terjadinya perpindahan panas sebelum air mencapai basin. Desain *filler* memungkinkan distribusi air yang merata sekaligus meningkatkan turbulensi udara, sehingga memperbesar peluang terjadinya perpindahan panas dan meningkatkan efisiensi pendinginan secara keseluruhan. Udara bergerak secara vertikal melalui *filler* sambil menyerap panas dari air. Optimalisasi geometri *filler* memungkinkan peningkatan kapasitas

pendinginan tanpa memerlukan penambahan ukuran fisik menara. Terakhir, *drift eliminator* berfungsi mengurangi kehilangan air (*drift loss*) akibat terbawa aliran udara ke luar *Cooling Tower*. Komponen ini dirancang untuk menangkap tetesan air dan mengembalikannya ke sistem, sehingga meminimalkan pemborosan air dan menjaga efisiensi operasi.

## **2.4 Induced Draft Cooling Tower**

*Cooling Tower* merupakan peralatan penukar panas yang digunakan untuk membuang kalor ke atmosfer melalui perpindahan panas antara air dan udara (Afshari & Dehghanpou., 2019). Berbagai tipe *Cooling Tower* dan jenis media isian (*filler*) telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, dan pada penelitian ini digunakan *Cooling Tower* tipe *induced draft*.

Proses penguapan di dalam *Cooling Tower* terjadi ketika air panas bersentuhan dengan udara yang memiliki tekanan uap lebih rendah. Perbedaan tekanan uap antara permukaan air dan udara yang dipengaruhi oleh suhu air dan tingkat kejenuhan udara menjadi pendorong utama terjadinya evaporasi. Pada *Cooling Tower* tipe *induced draft* dengan konfigurasi *counterflow*, air panas mengalir menuruni *filler*, sedangkan udara segar masuk dari bagian bawah dan bergerak ke arah atas. Dengan demikian, air dingin (*cold water*) yang keluar dari dasar *filler* akan selalu bersinggungan dengan udara dengan kelembapan relatif paling rendah, sehingga meningkatkan laju perpindahan panas.

Penguapan berlangsung sepanjang area *filler*, terutama pada bagian atas yang memiliki suhu air lebih tinggi. Udara yang mengalami proses jenuh di bagian tersebut akan dikompensasi oleh tingginya temperatur air, sehingga tetap tercipta perbedaan tekanan uap yang signifikan. Laju aliran udara yang lebih tinggi meningkatkan perbedaan tekanan parsial uap air, sehingga memperbesar laju evaporasi dan perpindahan panas di sepanjang area *fill*. Hal ini telah dijelaskan dalam panduan *evaporative cooling* modern yang menekankan bahwa *airflow* dan luas permukaan kontak air udara adalah dua faktor paling dominan dalam kinerja *Cooling Tower*.

*Filler* dirancang dengan struktur berkelok (*corrugated*) untuk memaksimalkan area permukaan kontak dan meningkatkan interaksi antara udara dan air. Struktur ini menghasilkan turbulensi yang menjaga distribusi aliran tetap

merata dan menghambat terbentuknya *boundary layer* pada permukaan air, sehingga meningkatkan efektivitas perpindahan panas. Selain itu, desain *filler* yang baik membantu mengurangi kehilangan air akibat terbawanya uap atau *droplet* ke luar sistem dengan mengarahkan aliran udara panas secara vertikal dan stabil (Qalbi *et al.*, 2024).

Faktor lain yang sangat mempengaruhi performa *Cooling Tower* adalah *wet bulb* udara masuk. Semakin rendah *wet bulb*, semakin besar kemampuan udara menyerap panas dan uap air, sehingga semakin rendah pula suhu keluaran air yang dapat dicapai (Purdue University, 2024).

## 2.5 Menentukan Tipe *Filler*

Perpindahan Panas dari air yang jatuh ke *filler Cooling Tower* terhadap udara yang mengalir berlawanan keatas dan bersentuhan langsung dengan *filler* merupakan fenomena yang menarik, 96% *Cooling Tower* di dunia menggunakan *filler* dengan material PVC dengan bentuk garis-garis dan melintang. Dari penelitian yang sudah pernah dilakukan, koefisien perpindahan panas dan tekanan dengan *filler* bergelombang dan berusuk meningkat secara signifikan dibandingkan dengan *filler* dengan bentuk yang *smooth* yang dipengaruhi oleh jarak *filler* dan jarak antar rusuk. Pada kondisi luas permukaan *filler* dan distribusi air pada lembaran seperti jarak antara rusuk berulang dan sudutnya terhadap aliran udara dan aliran air termasuk peranan penting pada *filler*, yang dihasilkan dari pengaruh distribusi air yang berbeda pada kedua sisi lembaran. Telah ditemukan bahwa pengepakan dengan turbulensi udara tinggi yang dikombinasikan dengan kecepatan fluida yang relatif rendah lebih ekonomis dibandingkan *filler* yang halus dan lurus yang dikombinasikan dengan kecepatan cairan yang tinggi.

Sesuai dengan CTI-105 Total padatan yang terlarut pada sirkulasi air harus dibatasi, padatan terlarut tidak boleh melebihi nilai 5000 ppm serta 1,1 kali dari konsentrasi desain, sehingga harus dilakukan pengujian air untuk mengetahui nilai TDS, TSS, Salinitas sehingga dapat menentukan tipe *filler* yang cocok pada saat kondisi akan dilakukan penggantian tipe *filler*, sehingga *filler Cooling Tower* yang dipilih efisien dan tepat. Penggunaan *filler* juga ditentukan dari air yang akan digunakan, apakah air yang digunakan adalah *fresh water* atau *sea water*.



Untuk memilih *filler* yang memiliki efisiensi lebih baik, tentunya harus memilih *filler* dengan *surface* yang jauh lebih luas, sehingga waktu kontak antara *filler* dengan air dan udara terjadi lebih lama.

## 2.6 Tower Capability Metode Performance curve

Evaluasi kinerja menara pendingin dengan metode *Performance curve* mengacu pada standar CTI ATC-105 memerlukan data desain sebagai acuan. Data tersebut meliputi laju alir air sirkulasi desain, temperatur air panas masuk, temperatur air dingin keluar, temperatur udara basah (*Wet-Bulb*) desain, serta *range* pendinginan. Selain itu, informasi daya *fan* (*fan driver power*) pada kondisi desain dan parameter atmosfer seperti tekanan barometrik atau elevasi juga diperlukan untuk perhitungan koreksi. Data ini digunakan untuk menentukan titik desain pada kurva performa manufaktur dan sebagai basis perbandingan terhadap hasil pengujian. Kurva performa yang disediakan oleh manufaktur biasanya mencakup variasi laju alir (90%, 100%, 110% dari desain) dengan sumbu absis berupa temperatur udara basah (*Wet-Bulb*) dan sumbu ordinat berupa temperatur air dingin keluar, serta parameter *range*. Dengan mengetahui data desain, penguji dapat melakukan interpolasi (*cross-plot*) untuk memperoleh laju alir prediksi (*predicted flow*) pada kondisi uji, kemudian menghitung *tower capability* sesuai persamaan yang ditetapkan oleh CTI ATC-105.

Dalam teori *Cooling Tower*, *wet bulb* adalah batas termodinamik minimum dan air tidak mungkin didinginkan dibawah  $T_{wb}$  maka CTI- 105 selalu mengaitkan performa *Cooling Tower* terhadap  $Approach = T_{cw} - T_{wb}$ , semakin kecil *approach* semakin baik performa. Konsep lainnya yang dijelaskan oleh CTI-105 adalah L/G, Secara fisik menjelaskan bahwa L/G terlalu besar berarti udara kurang dan pendinginan buruk, sedangkan L/G terlalu kecil berarti udara berlebih dan boros energi, CTI-105 menggunakan L/G sebagai parameter utama *performance curve*.

### 2.6.1 Performance curve

Cara ini untuk mengevaluasi kinerja *Cooling Tower* menggunakan metode *performance curve* yang dinyatakan dalam *capability. Performance curve* dari manufaktur harus di plot silang pada pengujian untuk menentukan kinerja. Prosedur pertama yaitu menyiapkan 3 set kurva, berdasarkan *wet bulb* pengujian,

menghubungkan *cooling range*, suhu air dingin (*cold water*), dan laju sirkulasi air. Dari rangkaian kurva kemudian dibuat satu kurva, berdasarkan *cooling range* pengujian yang menghubungkan suhu air dengan laju sirkulasi air. penentuan kinerja terdiri dari perbandingan prediksi laju aliran  $Q_{w\text{ pred}}$  dengan laju aliran air uji yang disesuaikan  $Q_{wt\text{ adj.}}$  perpindahan panas dan massa kinerjanya dipengaruhi oleh:

1. Kondisi lingkungan seperti *wet bulb*, *dry bulb* dan tekanan barometrik.
2. Beban *termal range* ( $T_{hw} - T_{cw}$ )
3. Laju alir air (*Flow rate*) dan udara (*Fan power*)

Karena interaksi variable terlalu kompleks, manufaktur membuat *performance curve* berdasarkan pengujian standar. Kurva ini menunjukkan hubungan antara:

1. *Wet bulb* ( $T_{wb}$ ) untuk sumbu X
2. *Cold Water* ( $T_{cw}$ ) untuk sumbu Y
3. *Range* ( $\Delta T$ ) untuk parameter
4. *Flow rate* ditunjukkan dengan kurva 90%, 100%, 110% dari desain

Dengan kurva ini, kita bisa memprediksi berapa laju alir air yang mampu didinginkan pada kondisi uji tertentu. Ini adalah dasar metode *performance curve*.

### 2.6.2 Prinsip *Cross-Plot*

*Cross-plot* dilakukan untuk mengetahui beberapa hal dibawah:

1. Kurva manufaktur biasanya disusun untuk kondisi desain tertentu (*range*,  $T_{wb}$ , *flow rate*).
2. Saat pengujian, kondisi bisa berbeda (misalnya  $T_{wb}$  lebih rendah dan *range* berbeda).
3. *Cross-plot* memungkinkan kita menyesuaikan kondisi uji dengan kurva desain agar dapat menentukan *predicted flow*  $Q_{w\text{ pred}}$ .

### 2.6.3 Langkah Teoritis *Cross-plot*

1. Masuk ke kurva pada  $T_{wb}$  uji baca  $T_{cw}$  untuk tiap % *flow*.
2. *Crossplot* #1:  $T_{cw}$  vs *Range* ambil nilai di *range* uji.

3. *Crossplot #2: T<sub>cw</sub> vs Flow*, tarik garis *horizontal* di T<sub>cw</sub> uji, dapatkan Q<sub>w\_pred</sub> (% dari *design flow*).
4. Q<sub>w\_pred</sub> adalah laju alir air yang seharusnya mampu didinginkan *tower* pada kondisi uji jika performanya 100%.

#### 2.6.4 Koreksi Q<sub>w</sub> *Adjusted*

Saat pengujian daya *fan* dan densitas udara bisa berbeda dari desain. Ini mempengaruhi aliran udara dan kapasitas pendinginan. Jika tidak dikoreksi, hasil akan bias.

1. *Fan Law* adalah Aliran udara  $\propto (\text{daya fan})^{1/3}$
2. Densitas udara akan mempengaruhi massa udara yang lewat sehingga densitas udara akan mempengaruhi perpindahan panas
3. Koreksi dilakukan agar *flow* uji setara dengan kondisi desain.

$$Q_{w,t,adj} = Q_{w,t} \left( \frac{W_d}{W_t} \right)^{1/3} \left( \frac{\rho_t}{\rho_d} \right)^{1/3} \dots\dots\dots 2.1$$

#### 2.6.5 Faktor Densitas Udara

Menggunakan nilai densitas udara pada saluran masuk *fan* dan penggerak output *fan* pada saat kondisi pengujian dan desain. Nilai desain dan pengujian untuk Densitas ( $\rho$ ), Volume spesifik ( $v$ ), dan entalpi ( $h$ ) udara harus ditentukan menggunakan tabel psikrometrik. Karena evaluasi didasarkan pada sifat psikrometrik udara pada saluran masuk *fan*.

Untuk *induced draft Cooling Tower*, kondisi udara pada saluran *inlet fan* sama dengan kondisi udara keluaran *Cooling Tower*. Kode pengujian ini mengharuskan bahwa baik untuk desain maupun uji, sifat-sifat udara keluaran ditentukan dengan perhitungan *heat balance*. Densitas udara mempengaruhi massa udara yang mengalir. Semakin besar massa udara, semakin besar kemampuan pendinginan. Karena densitas berubah dengan suhu, kelembaban, dan tekanan, koreksi ini penting agar hasil adil. Untuk *induced draft*, densitas udara di *fan inlet* = kondisi udara *outlet Cooling tower*.

Menghitung sifat udara keluaran desain adalah prosedur yang tidak rumit, sementara menghitung sifat udara keluaran uji memerlukan penggabungan persamaan *heat balance* (2.2) dengan persamaan (2.3) dan mengiterasi untuk

mendapatkan solusinya (CTI 105, 2000). Persamaan *heat balance* menyatakan bahwa panas yang didapatkan oleh udara sama dengan panas yang hilang dari air, berikut rumusnya:

$$L \times C_{pw} \times (T_{hw} - T_{cw}) = G \times (h_o - h_i) \dots\dots\dots 2.2$$

Disesuaikan untuk mengisolasi entalpi udara keluar, sehingga persamaan *heat balance* menjadi:

$$h_o = L/G \times C_{pw} \times (T_{hw} - T_{cw}) + h_i \dots\dots\dots 2.3$$

Kemudian asumsikan udara keluar jenuh lalu tentukan  $T_{out}$ ,  $\rho$ , dan  $v$ . Iterasi sampai entalpi cocok.

#### 2.6.6 Menentukan *Tower Capability*

*Capability* adalah  $C$ , di nyatakan dalam persentase aliran sirkulasi desain yang dihitung dalam persamaan berikut:

$$C = \frac{Q_{w,t,adj}}{Q_{w,t,pred}} \times 100\% \dots\dots\dots 2.4$$

### 2.7 Evaporasi *Cooling Tower*

Evaporasi adalah proses perubahan fase air dari cair menjadi uap, yang terjadi ketika air menyerap energi panas (disebut panas laten penguapan). Dalam sistem *Cooling Tower*, evaporasi memainkan peran utama dalam proses pelepasan panas dari air sirkulasi ke lingkungan (Lafta *et al.*, 2023).

Ketika air bersentuhan dengan udara yang lebih kering, molekul-molekul air dengan energi kinetik tinggi meninggalkan permukaan dan berubah menjadi uap. Proses ini didorong oleh perbedaan tekanan parsial uap air antara permukaan air dan udara sekitarnya. Untuk terjadinya perubahan fase ini, energi panas diambil dari air itu sendiri, sehingga menyebabkan penurunan suhu air yang tersisa. Dalam

kerangka neraca energi, panas yang hilang dari air sama dengan panas yang diterima oleh udara, sehingga untuk suatu volume kontrol di menara berlaku persamaan 2.2 (Lafta *et al.*, 2023). Dari persamaan tersebut dapat diturunkan hubungannya menjadi (Shinde *et al.*, 2023):

$$\frac{L}{G} = \frac{h_{out} - h_{in}}{C_{pw}(T_{in} - T_{out})} \dots\dots\dots 2.5$$

yang menunjukkan bahwa rasio L/G (laju aliran massa air terhadap laju aliran massa udara) merefleksikan intensitas kontak dan kapasitas udara untuk menyerap panas serta uap air dari air sirkulasi.

$$\frac{L}{G} = \frac{m_{air}}{m_{udara}} \dots\dots\dots 2.6$$

Secara fisik menggambarkan perbandingan beban air terhadap kapasitas udara yang tersedia untuk proses perpindahan panas–massa di *filler* (Lafta *et al.*, 2023). Pada L/G yang terlalu tinggi (air relatif banyak dibanding udara), kapasitas udara untuk menyerap panas laten dan sensibel menurun sehingga efisiensi dan *range* cenderung turun, sedangkan pada L/G terlalu rendah pendinginan meningkat tetapi konsumsi energi *fan* dapat meningkat sehingga muncul titik optimum operasi (Shinde *et al.*, 2023). Secara eksperimental, efisiensi maksimum dan *range* tertinggi sering dicapai pada rentang  $L/G \approx 0,96-1,44$  untuk menara *forced draft counterflow*, menunjukkan adanya puncak performa sebelum penurunan akibat keterbatasan kapasitas udara atau penalti *fan* (Kumar *et al.*, 2018).

Pada *Cooling Tower* tipe *induced draft*, udara dengan kelembaban relatif rendah dialirkan berlawanan arah dengan air panas. Sebagian kecil air menguap, dan panas laten untuk proses ini diambil dari air cair, sehingga air yang tersisa menjadi lebih dingin. Proses ini merupakan komponen utama dari mekanisme pendinginan, dibandingkan dengan perpindahan panas secara *sensible*.

Laju evaporasi dalam *Cooling Tower* sangat dipengaruhi oleh kondisi udara dan karakteristik aliran. Suhu dan kelembaban relatif udara merupakan faktor utama; udara yang lebih panas dan lebih kering akan meningkatkan evaporasi karena memperbesar selisih tekanan parsial uap air antara udara dan permukaan air, sehingga mempercepat perpindahan massa uap. Selain itu, luas permukaan kontak antara air dan udara juga sangat menentukan. Permukaan ini diperbesar melalui



penggunaan *filler* media atau sistem semprotan *nozzle* yang memecah air menjadi tetesan halus, sehingga meningkatkan area terjadinya penguapan. Tak kalah penting, kecepatan aliran udara memegang peranan penting karena aliran udara yang cepat akan mengangkut uap air yang terbentuk menjauh dari permukaan air, mempertahankan gradien tekanan parsial, dan mempercepat proses evaporasi secara keseluruhan. Besarnya air yang menguap dapat dihitung berdasarkan perbedaan massa uap air antara udara masuk dan keluar menggunakan rumus neraca massa berikut:

$$E = G \times (W_{out} - W_{in}) \dots\dots\dots 2.7$$

Evaporasi massa air dapat dinyatakan dari perubahan rasio kelembapan (*Humidity ratio*) udara di sepanjang menara:

$$m_{evap} = G (W_{out} - W_{in}) \dots\dots\dots 2.8$$

Jika dinyatakan sebagai fraksi evaporasi terhadap laju aliran air, maka:

$$\text{Evaporasi} = \frac{W_{out} - W_{in}}{L/G} \dots\dots\dots 2.9$$

Sehingga untuk selisih kelembapan  $\Delta w = (w_{out} - w_{in})$  yang sama, evaporasi fraksional meningkat ketika  $L/G$  menurun (udara relatif lebih banyak mengangkut uap air), tetapi  $\Delta w$  sendiri dipengaruhi oleh kondisi antarmuka yang juga berubah saat  $L/G$  (Lafta *et al.*, 2023). Dengan kata lain, terdapat *trade-off* sehingga  $L/G$  optimum tidak hanya memaksimalkan laten *cooling* (evaporasi) tetapi juga mempertimbangkan konsumsi daya *fan* dan karakteristik *fill* (luas spesifik dan *wettability*) yang memengaruhi *driving force* antarmuka (Shinde *et al.*, 2023). Dalam kerangka Merkel/NTU, besaran pendorong perpindahan panas–massa pada antarmuka air–udara direpresentasikan oleh  $(h^* - h)$ , di mana  $h^*$  adalah entalpi udara jenuh pada temperatur *film* air, sementara  $h$  adalah entalpi udara bulk, dan integral lintasan operasi sepanjang *fill* menghasilkan Merkel *Number* ( $Me$ ) dan NTU. Pengaturan  $L/G$  mengubah lintasan operasi (*operating line*) di ruang  $T_w, h$  sehingga  $Me/NTU$  dapat meningkat di sekitar  $L/G$  optimum dan menurun di luar rentang tersebut, konsisten dengan temuan numerik/eksperimental pada menara *forced draft*.

## 2.8 Perpindahan Panas *Cooling Tower*

Pada skala menara, kontribusi panas laten penguapan mendominasi, namun komponen panas sensibel (*sensible heat*) tetap penting untuk memformulasikan *range* dan *approach* serta mengevaluasi kapasitas perpindahan panas  $Q$  dari data operasi. Secara makro, kapasitas perpindahan panas air pada menara dapat dihitung dari perubahan suhu air masuk–keluar, formulasi ini adalah fundamental dari konservasi energi untuk *heat balance Cooling Tower* sebagai berikut:

$$Q = \dot{m} \times C_p \times (T_{in} - T_{out}) \dots\dots\dots 2.10$$

Perpindahan panas dalam sistem pendingin seperti *Cooling Tower* dapat dihitung dengan pendekatan dasar energi. Persamaan diatas merupakan formulasi fundamental yang mendeskripsikan jumlah panas yang dilepaskan oleh fluida (air) selama proses pendinginan. Dalam persamaan ini, ( $Q$ ) menyatakan laju perpindahan panas dalam satuan energi per waktu (W atau J/s), ( $\dot{m}$ ) adalah laju aliran massa fluida (kg/s), ( $c_p$ ) adalah kapasitas panas spesifik fluida (J/kg·K), dan  $T_{in}$  serta  $T_{out}$  adalah suhu fluida masuk dan keluar sistem, masing-masing dalam satuan °C atau K. Proses ini didasarkan pada prinsip konservasi energi (Cengel, Y. A., 2003) di mana energi panas yang dilepaskan oleh air dihantarkan ke udara melalui mekanisme perpindahan panas sensibel. Dalam *Cooling Tower*, perbedaan suhu air masuk dan keluar merupakan parameter utama yang mencerminkan kinerja pendinginan, sementara kapasitas panas spesifik air,  $C_p$  menggunakan temperatur rata rata masuk dan keluar *Cooling Tower* lalu di cari nilai  $C_p$  nya.

## 2.9 Number of Transfer Units (NTU)

*Number of Transfer Units* (NTU) merupakan parameter *dimensionless* yang sangat penting dalam mengukur dan menganalisis efektivitas perpindahan panas pada *Cooling Tower*. Konsep NTU merupakan bagian integral dari metode *effectiveness-NTU* (juga dikenal sebagai  $\epsilon$ -NTU method) yang dikembangkan untuk analisis penukar panas, termasuk *Cooling Tower*. Parameter ini memberikan wawasan mendalam tentang kinerja termal *Cooling Tower* dan memungkinkan perbandingan performa antar unit dengan kondisi operasi yang berbeda-beda (Incropera *et al.*, 2007; Kloppers & Kröger, 2005).

### 2.9.1 Konsep Dasar NTU

Dalam konteks *Cooling Tower*, NTU memiliki makna fisik yang penting. NTU mengukur jumlah "unit perpindahan panas" yang terjadi dalam sistem, dimana satu unit perpindahan didefinisikan sebagai perpindahan panas yang cukup untuk menurunkan temperatur fluida panas sebesar satu satuan (dalam hal ini, sebesar perbedaan temperatur antara *inlet* air panas dan *inlet* udara). Dengan demikian, NTU yang lebih tinggi menunjukkan bahwa *Cooling Tower* memiliki kapasitas perpindahan panas yang lebih besar relatif terhadap laju alir dan sifat termal fluida kerja.

Kloppers & Kröger (2005) menjelaskan bahwa NTU merupakan hasil dari interaksi kompleks antara beberapa faktor utama, yaitu:

1. Desain fisik *Cooling Tower*, yang mencakup tinggi *filler*, luas permukaan kontak, dan jenis *filler* yang digunakan untuk meningkatkan kontak antara air dan udara.
2. Laju alir air dan udara, yang mempengaruhi jumlah waktu kontak dan gradien suhu antara kedua fluida.
3. Sifat termal fluida, khususnya *heat capacity rate* (laju kapasitas panas) dari air dan udara yang bergantung pada temperatur dan kondisi atmosfer.
4. Kondisi operasi, termasuk distribusi aliran, efisiensi penyiraman, dan kondisi penyerapan panas di dalam *filler*.

Pengukuran NTU di lapangan memerlukan data operasional aktual seperti temperatur *inlet* dan *outlet* untuk air dan udara, serta laju alir kedua fluida. Data ini kemudian digunakan untuk menghitung efektivitas (*effectiveness*) *Cooling Tower*, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai NTU melalui hubungan *effectiveness*-NTU yang sesuai dengan konfigurasi aliran *Cooling Tower*. Melalui pemahaman yang mendalam tentang NTU, operator dan insinyur dapat melakukan evaluasi kinerja *Cooling Tower* yang akurat dan objektif, serta mengidentifikasi kebutuhan untuk *maintenance* atau *upgrade* peralatan.

### 2.9.2 Definisi Matematis NTU

*Number of Transfer Unit* (NTU) secara matematis didefinisikan sebagai rasio antara produk *overall heat Transfer coefficient* ( $U$ ) dan *heat Transfer surface area* ( $A$ ) terhadap *heat capacity rate* minimum ( $C_{\min}$ ) dari kedua fluida, yang

dinyatakan dalam persamaan berikut, Persamaan 2.11 - Definisi NTU (Incropera *et al.*, 2007):

$$NTU = \frac{U.A}{C_{min}} \dots\dots\dots 2.11$$

*Heat capacity rate* (C) untuk setiap fluida didefinisikan sebagai produk dari laju alir massa dan *specific heat capacity* pada kondisi temperatur rata-rata operasi Persamaan 2.12 – 2.13 *Heat Capacity Rate* (Incropera *et al.*, 2007):

$$C_h = \dot{m}_h \times c_{p,h} \dots\dots\dots 2.12$$

$$C_c = \dot{m}_c \times c_{p,c} \dots\dots\dots 2.13$$

Dimana indeks 'h' menunjukkan fluida panas (air dari condenser) dan 'c' menunjukkan fluida dingin (udara atmosfer). Sifat fluida (Cp) harus ditentukan pada temperatur rata-rata operasi untuk akurasi perhitungan yang optimal sedangkan efektivitas ( $\epsilon$ ) *Cooling Tower* secara fundamental didefinisikan sebagai rasio antara perpindahan panas aktual yang terjadi terhadap perpindahan panas maksimal yang secara teoritis dapat dicapai pada kondisi *inlet* tertentu. Definisi ini dinyatakan dalam persamaan berikut Persamaan 2.14 - Definisi Efektivitas (Incropera *et al.*, 2007):

$$\epsilon = q / q_{max} \dots\dots\dots 2.14$$

Data ini kemudian digunakan untuk menghitung efektivitas (*effectiveness*) *Cooling Tower*, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan nilai NTU melalui hubungan *effectiveness*-NTU yang sesuai dengan konfigurasi aliran *Cooling Tower*. Prosedur evaluasi NTU di lapangan meliputi langkah-langkah berikut:

$$C_r = C_{min} / C_{max} \dots\dots\dots 2.15$$

Untuk perpindahan panas aktual dari sisi air berdasarkan perubahan temperatur menggunakan rumus dibawah ini, rumus ini adalah aplikasi spesifik rumus yang *framework effectiveness*-NTU untuk mengevaluasi efektivitas *Cooling Tower*:

$$q = \dot{m}_h \times c_{p,h} \times (T_{h,in} - T_{h,out}) \dots\dots\dots 2.16$$

Untuk perpindahan panas maksimal Skenario teoritis ketika fluida panas keluar pada temperatur fluida dingin masuk

$$q_{max} = C_{min} \times (T_{h,in} - T_{c,in}) \dots\dots\dots 2.17$$

Setelah nilai  $\epsilon$  dan  $Cr$  diperoleh, NTU dihitung menggunakan Microsoft Excel lookup table *calculator* yang mengimplementasikan Incropera untuk konfigurasi aliran *counterflow*:

$$NTU = \ln[(1 - Cr \cdot \epsilon) / (1 - \epsilon)] / (1 - Cr) \dots\dots\dots 2.18$$

Microsoft Excel yang digunakan memiliki *lookup table* dengan berbagai nilai  $Cr$  (0, 0,25, 0,50, 0,75, 1,00) dan  $\epsilon$  (0 hingga 1,0) dengan *increment* 0,05. Dengan memasukkan nilai  $\epsilon$  dan  $Cr$ . Metode ini memastikan akurasi perhitungan.