

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Sistem Energi Panas Bumi (*Geothermal*)

Sebagai energi yang bersih dengan emisi gas buang yang relatif sangat kecil dibandingkan dengan pembangkit thermal lainnya, energi panas bumi memiliki peluang kontribusi yang cukup besar dalam hal menjaga sebuah negara dari efek buruk lingkungan. Dikarenakan energi ini diproduksi oleh inti bumi yang sifatnya tidak tak terbatas, maka pemanfaatan sumber energi panas bumi telah mendapatkan perhatian yang tinggi (Altun, 2019).

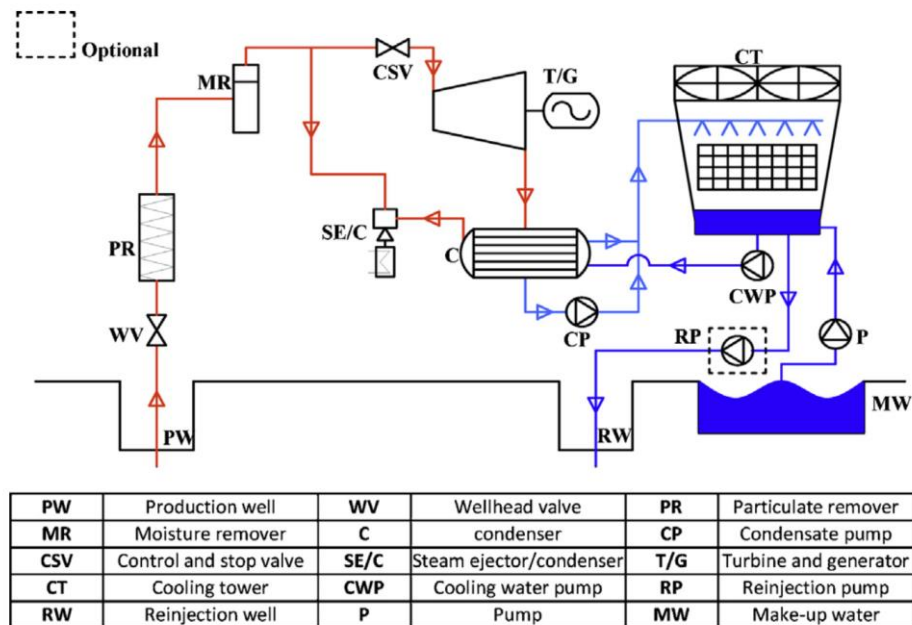
Sistem panas bumi merupakan suatu sistem penghantaran panas (*heat transfer*) di dalam mantel atas dan kerak bumi dimana panas (*heat*) dipindahkan dari suatu sumber panas (*heat source*) menuju suatu tampungan panas (*heat sink*) yang biasanya adalah permukaan bumi (Hochstein, 1990). Proses perpindahan panas di sistem panas bumi melibatkan fluida *thermal*, yaitu batuan yang meleleh dan gas-gas panas, air panas, *hot brine*, uap, dan gas-gas lainnya. Pada masing-masing kasus, partikel-partikel fluida bergerak dengan kekuatan mengambang dan perpindahan panas dari suatu daerah di dekat sumber panas menuju permukaan (*discharge area*).

Sistem panas bumi dikenal sebagai siklus yang tertutup dimana kondensat yang merupakan produk sampingan sebagai hasil dari proses perubahan fasa di dalam *condenser* kemudian akan dimanfaatkan kembali sebagai fluida pendingin di Pembangkit Listrik. Sesuai dengan teori keseimbangan massa, maka sisa dari kondensat yang tidak termanfaatkan akan kembali diinjeksikan ke dalam reservoir melalui sumur injeksi. Jumlah massa yang diinjeksikan kembali ini sedemikian sangat penting dan menjadi parameter keberlanjutan bagi pengelolaan reservoir (Xia, 2023).

Dalam pemanfaatan energi *geothermal* di Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi terdapat beberapa jenis siklus yang umum digunakan. Salah satunya adalah siklus uap kering (*dry steam*). *Dry steam* merupakan jenis PLTP dengan teknologi tertua di dunia dimulai sejak beroperasinya lapangan Lardarello di Italia pada tahun 1903. Beberapa lapangan lain yang juga menggunakan teknologi konvensional ini diantaranya adalah lapangan Geyser di USA, lapangan Kamojang dan lapangan Darajat di Indonesia.

Mekanisme sederhana dari siklus *dry steam* dapat dilihat pada gambar 2.1 di bawah. Uap dari sumur produksi (PW) dialirkan ke permukaan melewati *wellhead valve* (WV) dan *particle removal* (PR) untuk memisahkan padatan yang terkandung dalam uap. Setelah

melewati *particle removal*, uap akan mengalir ke *moisture removal* (RM) dimana didalamnya terjadi proses pemisahan uap dengan butiran-butiran embun sehingga memenuhi kualitas uap yang dipersyaratkan oleh turbine, biasanya bernilai 99,99% uap murni. Uap ini kemudian diatur tekanannya oleh *control and stop valve* (CSV) sebelum memasuki turbin untuk menghasilkan daya listrik. Uap yang keluar dari turbin kemudian akan dilakukan proses pengkondensasian di *condenser* (C) yang akan menghasilkan kondensat dan gas-gas tidak dapat dikondensasikan (NCG). Kondensat kemudian dipompakan ke *cooling tower* (CT) oleh *condensate pump* (CP) untuk didinginkan dan dialirkan kembali ke *condenser* (C). Di sisi lain, NCG akan dihisap oleh *steam ejector* (SE) dan dibuang ke lingkungan melalui cooling tower (CT). Sisa kondensat di cooling tower (CT) yang tidak dipergunakan untuk pendinginan di sistem, akan diinjeksikan ke *reinjection well* (RW) untuk keperluan reservoir.



Gambar 2.1 Skematik sederhana dari PLTP tipe *dry steam* (Zarouk & Moon, 2014)

Selain PLTP *dry steam*, pada lapangan geothermal berkarakter 2 fasa dan *water dominated*, biasa digunakan PLTP tipe *single flash* atau *double flash* dengan pertimbangan kandungan *enthalpy* dan kemampuan tekanan kepala sumur. Pada kasus tertentu dipilih PLTP dengan tipe *binary* yang dianggap mampu memberikan keuntungan secara komersial dan termal karena mempertimbangkan kandungan NCG yang tinggi, karena pada umumnya membutuhkan sistem pengekstrak gas dengan konfigurasi yang lebih kompleks.

2.2. Sistem Pendingin pada Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP)

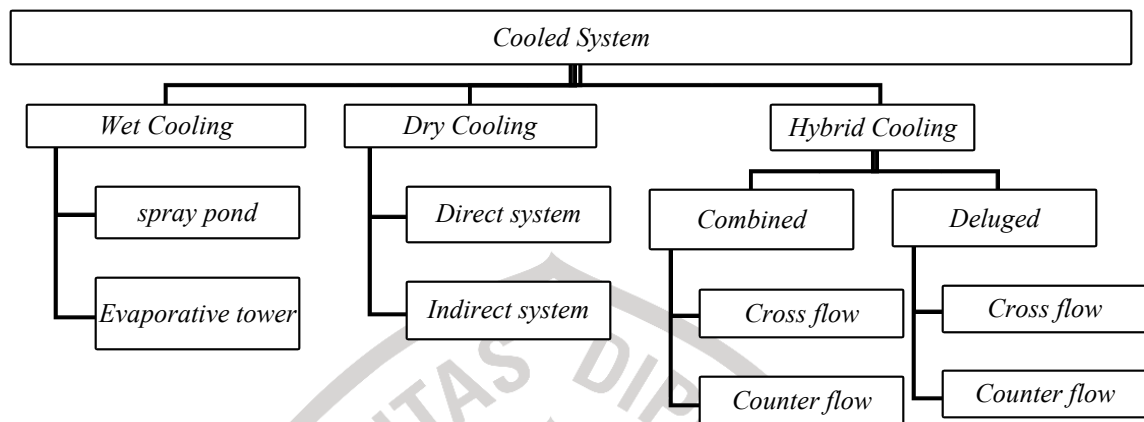
Selain siklus uap, di PLTP juga terdapat siklus air pending yang kemudian dibagi menjadi 3 siklus yaitu siklus pendingin utama (*main cooling water system*), siklus pendingin tambahan (*auxiliary cooling water system*), dan siklus pendingin komponen (*component cooling system*). Ketiga sistem pendingin tersebut memiliki fungsi dan proses yang berbeda. *Main cooling water system* (MCWS) dipasang dengan tujuan utama untuk mendinginkan dan mengkondensasikan uap yang keluar dari turbin, dengan peralatan utamanya adalah *hot well pump* (HWP) dan *cooling tower*. *Auxiliary cooling water system* (ACWS) merupakan sistem yang dimaksudkan sebagai pendingin tambahan untuk mendukung kinerja dari peralatan utama, seperti mendinginkan dan mengkondensasikan uap di *inter condenser*, sebagai *water sealing* di HWP dan *liquid ring vacuum pump* (LRVP), dan turut mendinginkan air di *component cooling water system* (CCWS). CCWS sendiri berfungsi untuk mendinginkan generator serta pelumas (oli) yang digunakan baik untuk keperluan hidraulik maupun pelumasan bantalan turbin-generator.

2.1.1. Jenis *cooling tower*

Cooling tower adalah sebuah komponen terintegrasi dari PLTP karena sisa panas dari turbin uap diharuskan dilakukan pendinginan secara kontinyu untuk menjaga keberlangsungan operasi PLTP (Guan, Zhiqiang. 2016). Pemanfaatan *cooling tower* di seluruh dunia semakin banyak dalam beberapa tahun belakangan ini dalam peruntukannya pada sejumlah aplikasi seperti pabrik petrokimia, pembangkit listrik, industri pengolahan makanan, unit pemisah udara, industri baja, sistem pendingin terpusat, dan industri kimia lainnya disebabkan oleh kemampuannya untuk menolak kemungkinan panas maksimumnya ke lingkungan sekitar (Aadhitiyan, A.K., 2021). Meskipun *cooling tower* memiliki banyak kegunaan, tetapi emisi dari *cooling tower* merupakan hal yang nyata dalam hal memberikan dampak ke lingkungan. Lebih jauh, kehilangan air karena proses evaporasi menjadi permasalahan yang serius khususnya di area gersang (Dong, P. et al., 2020) (Yu, Z. et al., 2021) dengan ketersediaan air yang sangat terbatas ataupun karena aspek regulasi.

Terdapat tiga jenis *cooling tower* yang biasa dipergunakan pada bermacam industri, *wet cooling tower*, *dry cooling tower* (Rezaei, Ebrahim et al, 2010), dan *hybrid cooling tower* (Graff, 2017). Berdasarkan arah aliran udara masuk, *cooling tower* dapat dibedakan menjadi aliran menyilang (*cross flow*) dan aliran balik (*counter flow*). Sedangkan ditinjau dari keberadaan pemakaian alat bantu (biasanya fan atau *blower*), *cooling tower* dapat dibedakan menjadi aliran terinduksi (*induced draft*), aliran paksa (*forced draft*), dan tanpa adanya

peralatan bantu (*natural*). Pada umumnya, *cooling tower* yang sering dipakai pada di pembangkit geothermal, terutama untuk PLTP sistem *flashing* dan *dry steam*, adalah *induced draft - wet cooling tower* dengan variasi arah aliran *cross* atau *counter flow*.



Gambar 2.2 Pembagian tipe sistem pendingin

Di PLTP secara umum, air dengan temperatur tinggi (biasanya 70 – 80 °C) di *condenser*, akan dipompakan oleh HWP ke *cooling tower* dan didistribusikan melalui pipa-pipa bercabang sebelum akhirnya dipecah oleh *nozzle/sprayer* kedalam butiran-butiran air. Butiran air ini akan bergerak turun oleh efek gravitasi hingga memasuki *fill zone*. Di area ini, butiran air akan berkontak dengan udara sekitar (*ambient*) yang memiliki temperatur rendah. Udara sekitar akan mengalir masuk ke dalam *cooling tower* sebagai akibat dari kerja putaran baling-baling (*fan*) baik terjadi secara induksi (*induced draft*) maupun dorongan (*forced draft*). Di area *filler*, butiran air akan menempati permukaan *filler* dimana terjadi interaksi antara air panas dengan udara yang masuk yang mana disertai dengan proses perpindahan panas dimana umumnya terjadi secara konveksi bersamaan dengan proses evaporasi. Air panas yang telah mengalami pendinginan kemudian akan berkumpul di *cold basin* sebelum akhirnya disirkulasikan kembali ke *condenser* untuk membantu proses kondensasi di sana. Sementara itu, udara yang telah melewati *drift eliminator* akan keluar ke atmosfer melalui cerobong dengan kondisi udara dengan kelembaban yang tinggi dan akan terus berinteraksi dengan udara luar hingga dijumpai kondisi saturasi.

Evaporative cooling tower adalah sistem di mana panas sensibel dan panas laten dipindahkan dengan memaparkan air panas langsung ke udara atmosfer. Perpindahan panas sensibel terjadi karena perbedaan antara suhu air dan suhu udara bola kering (*dry bulb temperatur*), sedangkan perpindahan panas laten terjadi karena perpindahan massa, yang dihasilkan dari gradien konsentrasi uap di udara, di permukaan air dan di udara pendingin.

Sistem ini melepaskan uap air ke atmosfer dalam jumlah yang banyak sehingga kadang-kadang diperlukan penambahan air karena adanya *water losses* tersebut.

Tabel 2.1 Perbandingan *cooling tower* tipe *counter flow* dan *cross flow*

	<i>Counterflow</i>	<i>Crossflow</i>
Sirkulasi udara	Risiko rendah	Risiko lebih tinggi karena inlet udara pada segmen yang tinggi.
Pemeliharaan	Lebih minim	Pertumbuhan alga cenderung sangat massif dan tidak direkomendasikan pada lingkungan dengan potensi debu yang tinggi menyebabkan pemeliharaan lebih kompleks.
Biaya investasi awal	Mahal	Sedikit lebih murah
Luasan area yang diperlukan	Area lebih kecil	Memerlukan area yang lebih luas untuk konstruksinya.
Pengembangan di masa mendatang	Ketinggian fill area mungkin dapat disesuaikan dengan modifikasi.	Tidak dapat dimodifikasi untuk menambah fill area.
Konsumsi daya	Konsumsi listrik lebih rendah karena kebutuhan udara masuk yang lebih sedikit.	Konsumsi daya lebih tinggi.

a) *Wet Cooling tower*

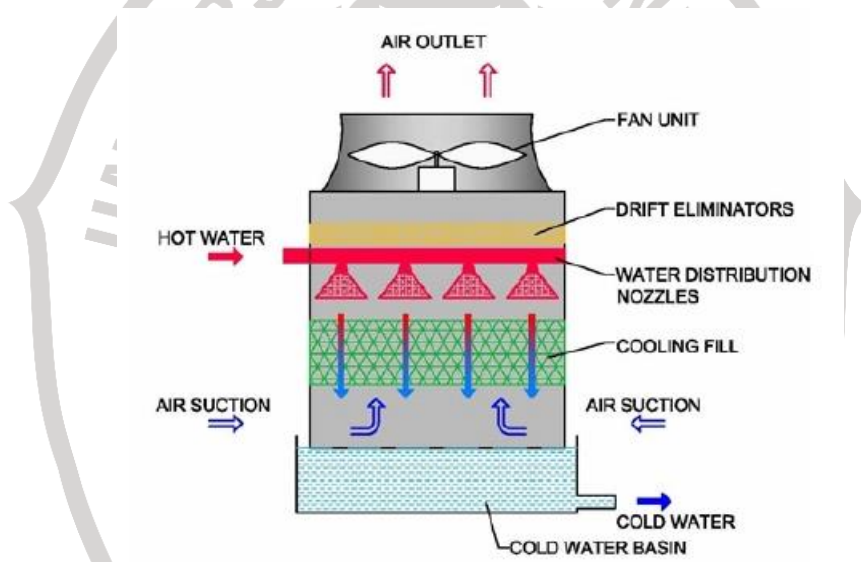
Wet cooling towers telah dikenal sebagai salah satu alat penukar panas dengan prinsip *direct contact* berdasarkan pada proses evaporasi dari air di dalam sebuah media *packing / filler*. Meskipun aliran air cenderung bertemperatur rendah sebagai akibat dari panas sensible, sebagian besar penolakan panas di dalam *wet cooling tower* disebabkan oleh evaporasi dari sejumlah air ke dalam aliran udara (Hosoz. M., et. al. 2007). Tipe ini mengkonsumsi air dengan jumlah yang tinggi karena *evaporation loss*, *drift losses*, dan *draining losses* serta *visible plump* mungkin dapat terbentuk di *fan stack* bergantung pada kondisi operasi dan design. Untuk menghindari kehilangan massa air yang berlebihan, sejumlah inovasi ditemukan dan masih terus dikembangkan hingga saat ini. Skematik dari *wet cooling tower* dapat dilihat pada Gambar 2.3.

b) *Dry Cooling tower*

Pada *dry cooling tower*, panas dipindahkan melalui *air-cooled heat exchanger* yang memisahkan fluida kerja dari udara pendingin. Karena tidak ada kontak langsung antara fluida

kerja dan udara lingkungan, tidak ada air yang hilang akibat *evaporation loss* maupun *drift losses* di dalam sistem ini (Hooman, et.al., 2021). Akan tetapi, *dry cooling tower* memerlukan area permukaan yang besar dan memiliki konsumsi energi yang relatif tinggi, bahkan dengan suhu air yang lebih tinggi sekalipun, dibandingkan dengan *wet cooling tower*.

Pada pembangkit listrik geothermal, *dry cooler* sering dipilih untuk jenis PLTP binary karena pertimbangan tidak adanya *fluid losses*, dimana uap keluaran turbin dikondensasikan secara langsung melalui *air-cooler condenser* (ACC). Uap keluaran turbin mengalir secara langsung dari pipa-pipa kecil di ACC ke *heat exchanger* dimana uap tersebut mengalami kondensasi karena proses perpindahan kalor dengan udara lingkungan yang mengalir karena efek induksi dari baling-baling. Skematik dari *dry cooling tower* dapat dilihat pada Gambar 2.4.



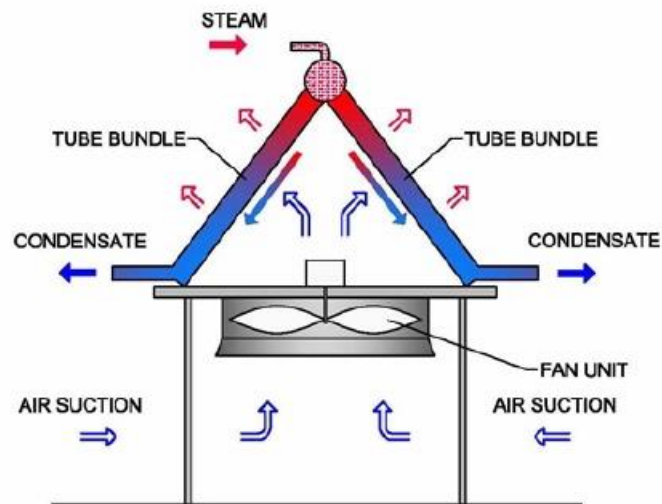
Gambar 2.3 Skema *wet cooling tower* (Alonso, Peris. 2019)

c) *Hybrid Cooling tower*

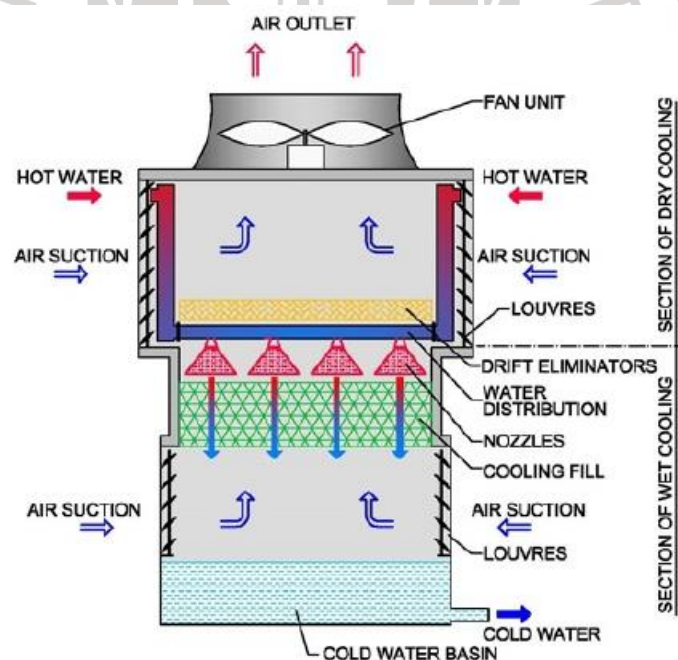
Skematik dari hybrid cooling tower dapat dilihat pada Gambar 2.5, dimana tipe ini merupakan kombinasi antara *dry* dan *wet cooling towers* untuk membuang limbah panas ke atmosfer (Kosten, 1994). *Hybrid cooling tower* dapat diaplikasikan pada range konfigurasi yang lebih luas dibandingkan dengan kedua tipe *cooling tower* sebelumnya (Streng, 1998).

Secara prinsip, air panas mengalir pertama kali melalui segmen *dry cooling* dimana *finned HE* akan menurunkan *temperature* dari air panas tersebut. Setelah itu, air akan memasuki segmen *wet cooling* dan disemprotkan di atas *cooling fill* yang akan meningkatkan evaporasi sekaligus menurunkan *temperature*. Udara meninggalkan segmen *dry cooling*

dipanaskan tanpa menambahkan kelembapan sehingga menjadi udara panas dengan *relative humidity* (RH) yang rendah.



Gambar 2.4 Skema *dry cooling tower* (Alonso, Peris. 2019)



Gambar 2.5 Skema *hybrid cooling tower* (Alonso, Peris. 2019)

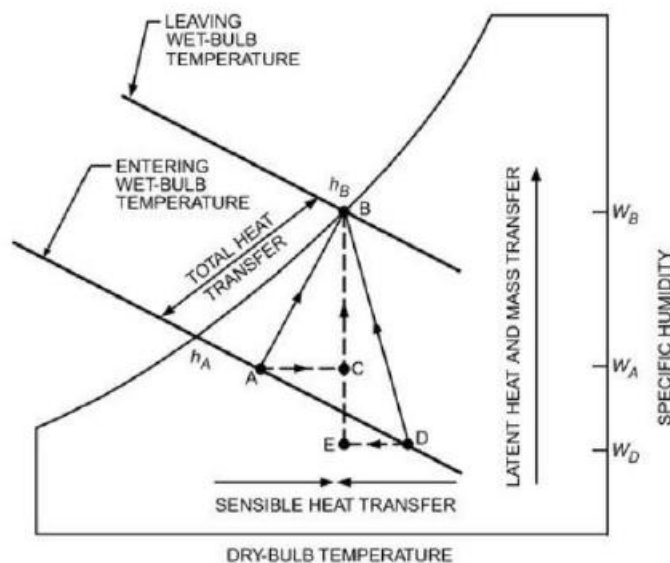
2.1.2. Prinsip Kerja *Wet Cooling tower*

Cooling tower beroperasi berdasarkan prinsip perpindahan kalor laten yaitu perpindahan kalor yang melibatkan perubahan fasa dan sensible yaitu perpindahan kalor yang melibatkan perubahan *temperature*. Untuk membantu menggambarkan fenomena yang terjadi,

maka analisa psikometrik dari udara yang memasuki *cooling tower* dapat dipresentasikan oleh Gambar 2.6.

Udara memasuki *cooling tower* pada titik A, menyerap kalor dan massa (kelembapan) dari air yang mengalir dari atas, dan keluar meninggalkan *cooling tower* pada titik B yang mana umumnya pada kondisi saturasi (Alonso, 2019). Pada beban pendinginan yang kecil, udara keluaran mungkin dapat berada pada kondisi sub-saturasi. Udara yang terpanasi (vektor AB), dapat dipisahkan ke dalam komponen vector AC yang mewakili bagian kalor sensible dari panas yang diserap oleh udara sebagai air yang didinginkan. Serta komponen vektor CB yang merepresentasikan bagian kalor latent (evaporasi). Apabila kondisi udara yang masuk berubah seperti di titik D pada wet-bulb *temperature* yang sama (tetapi dengan *dry-bulb temperature* yang lebih tinggi), maka total perpindahan kalor menjadi konstan, sedangkan kalor sensible dan latent berubah secara signifikan. Vektor DE merepresentasikan pendinginan secara sensible terhadap udara, sedangkan vector EB mewakili pemanasan latent sebagaimana air mengalami evaporasi. Oleh sebab itu, untuk beban pendinginan air yang sama, rasio perpindahan kalor latent terhadap kalor sensible dapat bervariasi bergantung pada kondisi *temperature* lingkungan.

Dari grafik tersebut dapat kita ketahui bahwa performa pendinginan dari sebuah *cooling tower* sangat bergantung pada wet-bulb *temperature* (T_{wb}) yang memasuki *cooling tower*. Di sisi yang lain, *dry-bulb temperature* (T_{db}) udara dan *relative humidity* (RH) udara, memiliki pengaruh yang tidak signifikan pada performa *cooling tower*, tetapi memberikan efek pada laju penguapan air di *cooling tower* (Takata, 2016).



Gambar 2.6 Analisis psikometrik fluida memasuki *cooling tower* (ASHRAE, 2008)

2.3. Performa *Cooling tower*

Para peneliti telah banyak mengkaji performa termal dari *cooling tower* melalui pengembangan model matematis (Hajidavalloo dkk., 2010). Pada tahun 1925, Merkel memperkenalkan teori evaluasi termal *cooling tower* yang kemudian dikenal luas dan banyak digunakan (Merkel dkk., 1925; Reuter dkk., 2012; Naik dkk., 2017). Mirip dengan asumsi sederhana pada metode Merkel, metode *effectiveness of Number Thermal Unit* (e-NTU) juga dikembangkan untuk menganalisis kinerja termal *cooling tower* (Jaber dkk., 1989; Stabat dkk., 2004). Bahkan, perbandingan dan analisis mendalam terhadap tiga model matematis—metode Merkel, e-NTU, dan Poppe—pernah dilakukan (Kloppers dkk., 2005).

2.2.1. *Range*

Range merupakan penurunan temperatur air yang memasuki *cooling tower* (t_{in}) dan temperatur setelah air meninggalkan *cooling tower* (t_{out}). Semakin besar nilai *range* berarti bahwa *cooling tower* telah mampu menurunkan temperatur air secara efektif dengan kinerja yang baik. Secara matematis, *range* dituliskan sebagai:

$$t_{in} - t_{out} \quad (2.1)$$

2.2.2. *Approach*

Approach adalah selisih antara temperatur bola basah (*wet bulb temperatur*) yang memasuki *cooling tower* dengan suhu air yang keluar *cooling tower*. Secara matematis, *approach* dituliskan sebagai berikut:

$$t_{out} - T_{w,in} \quad (2.2)$$

2.2.3. *Effectiveness*

Efektivitas *cooling tower* merupakan persentase perbandingan antara *range* dan *range* ideal, yakni perbedaan antara temperatur masuk air pendingin dengan *wet bulb temperatur*. Semakin tinggi efektivitas *cooling tower*, maka dapat dikatakan bahwa performa *cooling tower* semakin bagus.

$$Effectiveness = \frac{Range}{Range + Approach} \times 100\% \quad (2.3)$$

2.2.4. Kapasitas Pendinginan

Kapasitas pendinginan merupakan panas yang dilepaskan sebagai hasil dari kecepatan aliran massa air, panas spesifik, dan perbedaan temperatur. Kapasitas pendinginan dapat didekati dengan persamaan berikut ini:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Dimana Q adalah kapasitas pendinginan (kW), m adalah laju massa aliran air (kg/s), c adalah kalor spesifik air (kJ/kg.°C), dan ΔT adalah perbedaan temperatur antara air yang masuk dan yang keluar *cooling tower* (°C).

2.4. **Water Losses pada Cooling Tower**

Terlepas dari segala keunggulannya dibandingkan alat penukar panas yang lain, *wet cooling tower* memerlukan air dengan jumlah yang besar dan sebagian dari air tersebut akan hilang selama proses pendinginan berlangsung. Kehilangan air ini dapat terjadi melalui beberapa mekanisme yaitu karena evaporasi (*evaporation losses*), pembuangan (*blow down losses*), dan perlintasan (*drift losses*). Untuk menjaga kesetimbangan massa air di *cooling tower*, maka perlu dilakukan penambahan sejumlah air yang disebut sebagai *make up water*. Secara matematis, *make up water* dapat dituliskan ke dalam persamaan berikut:

$$L_m = b_L + d_L + e_L \quad (2.5)$$

Dimana L_m adalah *make up water*, b_L adalah *blow down losses*, e_L adalah *evaporation loss*, dan d_L adalah *drift losses*.

2.3.1. *Blowdown Losses*

Blow down diperlukan dalam operasional *cooling tower*, terutama pada sistem dengan risiko kemunculan kontaminan dan partikel padatan yang lebih tinggi yang dapat memperburuk efisiensi dan mengurangi umur manfaat dari *cooling tower* itu sendiri (Shublaq. M, et. al. 2020). Pada fluida geothermal, secara alami akan mengandung mineral terlarut dan selama air mengalami proses penguapan, uap air akan bercampur dengan udara sekitar hingga mengalir ke dalam *cooling tower*. Peristiwa ini akan menimbulkan padatan terlarut dan mineral berkonsentrasi di dalam *basin* yang akan meningkatkan parameter *total dissolved solid* (TDS) di dalam air resirkulasi (Morisson, 2015). Kenaikan TDS dapat berimplikasi pada risiko terjadinya *scaling*, pertumbuhan mikroba, dan korosi yang bersifat destruktif. Pada beberapa kondisi, diperlukan penambahan *biocide* untuk mengendalikan pertumbuhan mikroba dan mengurangi potensi korosi, akan tetapi pada sisi yang lain turut meningkatkan nilai TDS itu sendiri disebabkan oleh sejumlah sisa bangkai mikroba yang larut di dalam air. Perhitungan *blowdown losses* dapat didekati dengan persamaan berikut:

$$b_L = e_L + (CoC - 1) \quad (2.6)$$

Dengan CoC adalah *cycle of concentration*, yaitu terminologi yang menjelaskan hubungan antara jumlah *make up water* dan jumlah dari *blow down*. CoC menjadi indikasi penting dalam menentukan efektifitas sistem pendingin di *cooling tower* dalam hal penggunaan air, sehingga

dapat dikatakan bahwa apabila CoC mengalami peningkatan, maka *water losses* akan mengalami penurunan. Pada beberapa *cooling tower* dengan design tanpa dilengkapi dengan *blow down*, maka dapat dikatakan *blowdown losses* bernilai 0. Konsekuensi dari hal ini, maka diperlukan strategi pemeliharaan yang lebih baik untuk menjaga *integrity* dan efisiensi dari *cooling tower*, salah satunya adalah dengan pembersihan *basin* dan *filler cooling tower* bersamaan dengan periode pemeliharaan tahunan.

2.3.2. *Drift Losses*

Air kondensat dari *condenser* dipompakan ke *cooling tower* melalui jaringan pipa air dari HWP menuju menara bagian atas dan dipecah menjadi butiran-butiran air kecil (*droplet*) oleh *sprayer*. Butiran-butiran air ini kemudian akan bergesekan dengan udara yang terinduksi oleh fan sehingga terjadi perpindahan kalor. Sejumlah butiran air yang gagal turun ke bawah karena efek dari aliran udara ke atas kemudian akan dikumpulkan oleh *drift eliminator*, dimana butiran kecil tersebut lambat laun akan terkumpul menjadi jumlah yang besar hingga mampu melawan gaya tarik dari aliran udara ke cerobong *cooling tower*. Akan tetapi pada kenyataannya terdapat sejumlah butiran air yang gagal ditangkap oleh *drift eliminator* tersebut hingga akhirnya terbawa ke lingkungan yang disebut sebagai *drift losses*. *Drift losses* biasanya bernilai 0,1 – 0,3% dari total air resirkulasi.

2.3.3. *Evaporation loss*

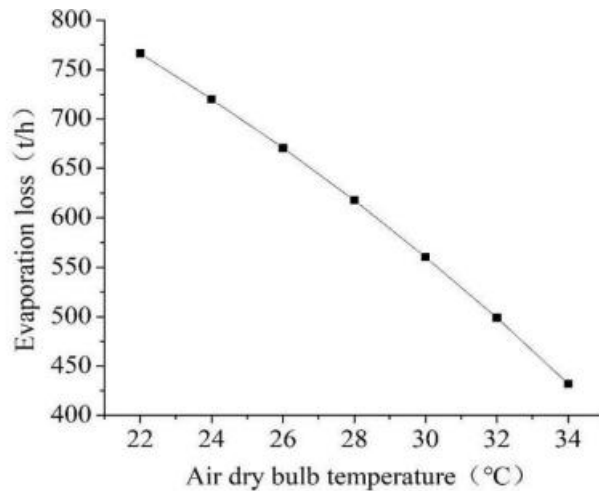
Evaporation loss di *cooling tower* terjadi sebagai hasil dari air yang didinginkan oleh udara yang memasuki *cooling tower* yang menerima panas laten dari penguapan air sehingga menyebabkan air mengalami penguapan. Proses penguapan yang berlangsung dapat dibagi ke dalam 4 tahapan:

- Tahap 1 dimana air panas dari sistem dipompakan ke bagian atas *cooling tower*. Air ini kemudian akan didistribusikan melalui *spray nozzles* membentuk tetesan-tetesan kecil (*droplet*) yang menyebar tepat di atas *filler (packing)*. Droplet tersebut kemudian akan dipecah kembali oleh *filler* sehingga luas permukaan kontak antara udara dan air menjadi bertambah.
- Tahap 2 yaitu perpindahan kalor sensible dan laten. Ini dimulai ketika air panas bersentuhan langsung dengan udara yang lebih dingin dan kering, terjadi dua jenis perpindahan kalor yaitu transfer panas sensible dimana sebagian kecil panas dipindahkan secara langsung dari air ke udara melalui proses konveksi, menyebabkan suhu udara sedikit meningkat dan suhu air sedikit menurun dan transfer panas laten (evaporasi) dimana ini merupakan proses yang paling dominan dimana 75 – 95% dari

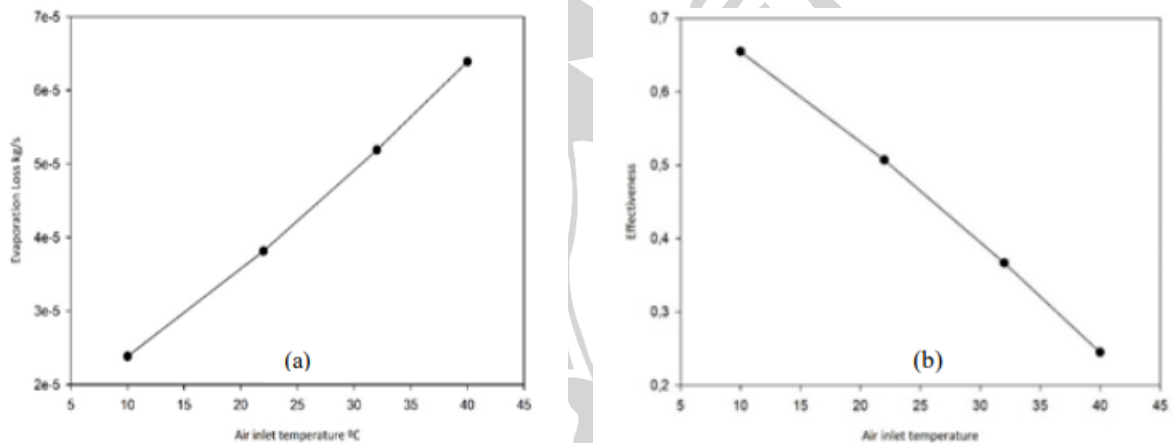
proses pendinginan merupakan andil dari transfer panas ini. Kontak antara air panas dan udara yang dingin serta belum jenuh menyebabkan sebagian air berubah menjadi uap. Proses ini membutuhkan energi panas yang diserap dari air itu sendiri, menjadikan air yang menguap sebagai "pembawa" panas dari volume air yang tidak menguap.

- Tahap 3 yaitu pendinginan. Ketika panas laten ditarik dari air, suhu air yang tidak menguap akan menurun drastis. Air yang telah mencapai suhu diinginkan ini selanjutnya ditampung di bak penampungan di bagian bawah menara pendingin, sebelum didistribusikan kembali ke proses atau peralatan yang memerlukan pendinginan.
- Tahap 4 yaitu pembuangan uap air ke atmosfer. Sebagai hasil dari proses penguapan, uap air bersama udara yang telah jenuh dilepaskan ke atmosfer dari puncak menara pendingin. Fenomena ini, yang dikenal sebagai *evaporation loss* atau kehilangan air, merupakan konsekuensi alami dan mutlak dari pendinginan evaporatif, karena penguapan adalah cara utama panas dihilangkan dari sistem.

Evaporation loss sangat dipengaruhi oleh beberapa kondisi baik dari faktor lingkungan maupun faktor kebutuhan operasional. Yuan, Wei (2021) telah melakukan eksperimen pada *natural draft wet cooling tower* (NDWCT) dan menyimpulkan bahwa kenaikan *temperature* bola kering akan meningkatkan *evaporation loss*. Disamping itu, kelembaban relatif yang lebih tinggi akan menurunkan *evaporation loss* yang akan diikuti dengan kenaikan *temperature* air yang keluar ke basin *cooling tower*. Di sisi lain, pada beban termal yang konstan, kenaikan laju air sirkulasi tidak memiliki dampak yang signifikan pada *evaporation loss*. Momin, nave (2024) telah melakukan penelitian pada *cooling tower* tipe *induced draft* dan menemukan bahwa pada skala laboratorium, *evaporation loss* adalah sebesar 4,63% dari jumlah massa air sirkulasi dengan effectiveness mencapai 52,94%. Yuan, Wei (2020) menggunakan metoda merkel yang telah dimodifikasi dan menyimpulkan bahwa setiap kenaikan setiap kenaikan 1 °C suhu udara akan menurunkan *evaporation loss* sebesar 26,65 ton/jam (sekitar 0,157% dari air sirkulasi) dan setiap 1% kenaikan kelembaban relatif (RH) akan menurunkan *evaporation loss* sekitar 5,63 ton/jam (sekitar 0,033% dari total air sirkulasi). Sementara itu, apabila mengacu pada *ASHRAE Handbook for HVAC Application*, disebutkan bahwa *evaporation loss* biasanya berkisar 0,1% - 0,3% dari massa air per °F atau sekitar 0,18% untuk setiap 1 °C perubahan temperatur.



Gambar 2.7 *Evaporation loss* pada variasi *dry bulb temperature* (Yuan, Wei. 2020)



Gambar 2.8 Pengaruh *air inlet temperature* terhadap *evaporation loss* dan *effectiveness* (Kılıç, 2020).

2.5. Computational Fluid Dynamics (CFD)

2.4.1. Dasar teori CFD dan Aplikasinya pada Rekayasa Termal

Computational Fluid Dynamics (CFD) merupakan perangkat metode numerik yang diaplikasikan untuk mendapatkan perkiraan solusi dari masalah fluida dinamis dan perpindahan panas (Zikanov, 2010). Persamaan yang menggambarkan aliran fluida telah dikenal selama lebih dari satu abad. Meskipun bentuknya rumit, penyelesaiannya sangat bermanfaat untuk memahami perilaku aliran fluida, khususnya terkait dinamika dan perpindahan panas. Sayangnya, persamaan tersebut tidak bisa diselesaikan dengan cara yang mudah. Oleh karena itu, metode numerik digunakan sebagai langkah komputasi untuk memperoleh solusi pendekatan. Pendekatan ini mengungguli secara teoritis dan eksperimen pada beberapa aspek penting seperti keuniversalan, fleksibilitas, akurasi, dan biaya. (Zikanov,

2010). Terdapat tiga persamaan yang mendeskripsikan hukum konservasi fisika klasikal, yaitu konservasi massa, persamaan momentum, dan konservasi energi.

ANSYS Fluent memanfaatkan metode volume hingga (*finite volume*) dengan cara membagi domain fluida menjadi sejumlah elemen kecil dan menyelesaikan persamaan fisika pada tiap elemen tersebut. Metode ini berbasis pada konsep kontrol volume, di mana persamaan transport disusun melalui proses integrasi terhadap masing-masing volume kontrol. Proses ini dimulai dari bentuk integral dari persamaan transport (Ansys, 2017).

$$\int_V \frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} dV + \oint \rho\phi \vec{v} \cdot d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.7)$$

Integral volume didiskretisasi dengan membagi domain ke dalam elemen-elemen numerik, kemudian hasil integrasi lokal dari masing-masing elemen diakumulasi ke volume kontrol target melalui proses agregasi numerik. Sementara itu, integral permukaan dihitung dengan pendekatan diskret pada titik-titik kuadratur yang terletak di pusat segmen permukaan, menggunakan elemen permukaan sebagai basis, dan hasilnya didistribusikan ke volume kontrol yang berdekatan sesuai dengan skema distribusi konservatif.

$$\frac{\partial (\rho\phi)}{\partial t} V + \sum_f^{N \text{ faces}} (\rho_f \phi_f \vec{v}_f) \cdot \vec{A}_f = \sum_f^{N \text{ faces}} \Gamma_\phi \nabla \phi_f \cdot \vec{A}_f + S_\phi V \quad (2.8)$$

Dengan f sebagai representasi nilai pada volume kontrol (ANSYS, 2017), persamaan di atas dapat disesuaikan untuk diterapkan pada setiap volume kontrol dalam domain yang dianalisis. Setelah proses diskretisasi dan substitusi dilakukan, persamaan tersebut berubah menjadi bentuk aljabar diskrit yang dapat diselesaikan menggunakan metode iteratif, seperti *conjugate gradient*, *multigrid*, atau teknik numerik lainnya yang sesuai.

2.4.2. Model Matematis

Pendekatan numerik pada CFD digunakan untuk menyelesaikan fenomena aliran fluida dan perpindahan panas melalui pemecahan persamaan diferensial parsial yang kompleks. Kerangka teoritis CFD dibangun secara hierarkis, dimulai dari persamaan fundamental yang mendeskripsikan hukum konservasi massa, momentum, dan energi. Namun, karena fenomena aliran nyata sering melibatkan kondisi yang tidak dapat direpresentasikan secara langsung oleh persamaan dasar, diperlukan model tambahan untuk menutup sistem persamaan, seperti model turbulensi, radiasi, dan multiphase. Selain itu, sub-model spesifik digunakan untuk memodelkan fenomena detail seperti interaksi partikel, transport spesies, dan mekanisme

perpindahan panas yang lebih kompleks. Pemahaman terhadap struktur hierarki ini penting untuk memastikan bahwa simulasi CFD mampu merepresentasikan kondisi fisik secara akurat dan sesuai dengan tujuan analisis.

2.4.2.1. *Governing equations*

Persamaan fundamental dalam CFD mencakup persamaan kontinuitas, momentum, energi, dan transport spesies yang berasal dari hukum konservasi massa, momentum, dan energi. Persamaan ini bersifat universal dan menjadi dasar untuk mendeskripsikan perilaku fluida dalam berbagai kondisi. Persamaan kontinuitas memastikan konservasi massa, sedangkan persamaan momentum (Navier–Stokes) mengatur distribusi gaya dan kecepatan fluida. Persamaan energi mengakomodasi perpindahan panas melalui konveksi yang mana merupakan proses paling dominan di *cooling tower* ini. Selain itu, persamaan transport spesies digunakan untuk memodelkan distribusi komponen dalam aliran yang mendukung pemodelan evaporasi.

a. Persamaan kesetimbangan energi dan massa di *fill zone*

Untuk menyederhanakan proses analisis pada *fill zone* dalam *wet cooling tower*, sejumlah asumsi teknis umum diterapkan, antara lain:

- Proses perpindahan kalor dan massa diasumsikan hanya berlangsung dalam arah tegak lurus terhadap arah aliran utama (*normal direction*), sehingga komponen longitudinal diabaikan.
- Interaksi termal dan difusi massa antara fluida di dalam menara dan lingkungan eksternal melalui dinding struktur dianggap tidak signifikan dan oleh karena itu diabaikan.
- Distribusi temperatur air pada setiap penampang lintang (*cross-sectional area*) diasumsikan seragam (*uniform*), sehingga gradien temperatur lateral tidak diperhitungkan dalam model.

Kesetimbangan energi dan massa pada keadaan *steady state* antara udara dan air pada volume inkremental dituliskan sebagai berikut:

$$\dot{m}_a dh = (\dot{m}_{w,in} - \dot{m}_a (W_{out} - W)) dh_{f,w} + \dot{m}_a dW h_{f,w} \quad (2.9)$$

Kesetimbangan massa air dan uap air pada sisi udara adalah sebagai berikut:

$$\dot{m}_a dW = h_D A_V dV (W_{s,w} - W) \quad (2.10)$$

Kesetimbangan energi air dapat dituliskan ke dalam bentuk koefisien perpindahan kalor dan massa h_c dan h_D :

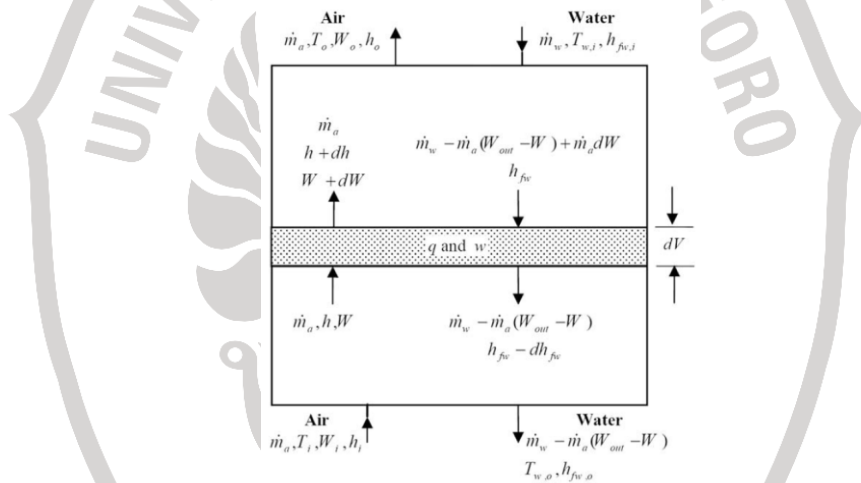
$$\dot{m}_w dh_{f,w} + \dot{m}_a dh_{f,w} = h_c A_v dV(T_w - T) + h_D A_v dV h_{fg,w} (W_{s,w} - W) \quad (2.11)$$

Dengan memasukkan faktor lewis ke dalam persamaan di atas di dapatkan persamaan baru:

$$\frac{dh}{dW} = Le_f \frac{(h_{s,w}-h)}{(W_{s,w}-W)} + (h_{fg,w} - h_g^0 Le_f) \quad (2.12)$$

b. Persamaan kesetimbangan energi dan massa di spray zone dan rain zone

Kontribusi droplet air terhadap keseimbangan termal dan massa dalam *cooling tower* sangat dipengaruhi oleh diameter droplet, yang secara langsung bergantung pada laju aliran massa air di zona semprotan (*spray zone*). Peningkatan laju alir massa air menyebabkan penurunan ukuran droplet, sebagai akibat dari kenaikan *pressure drop* yang terjadi pada *nozzle spray*. Fenomena ini telah dijelaskan oleh Fisenko et al. (2002), yang menunjukkan bahwa karakteristik semprotan air memainkan peran penting dalam efisiensi perpindahan kalor dan massa di dalam sistem.



Gambar 2.9 Skema aliran massa dan energi dalam volume kontrol

Pengaruh jumlah droplet per unit volume (c) dituliskan sebagai:

$$n_v = \frac{3G_w}{4\pi\rho_w R_{d,eff}^3 v_d} \quad (2.13)$$

Reynolds number dan *nusselt number* didefinisikan menggunakan persamaan berikut ini:

$$Re_d = \frac{2\rho_a R_{d,eff} [(v_d - v_a)^2 + v_{d,hor}^2]^{1/2}}{\mu_a} \quad (2.14)$$

$$Nu_d = 2 + 0,5 (Re_d^{0,5}) \quad (2.15)$$

Dimana C adalah koefisien diffuse dari uap air. Gaya hambat aerodinamis dari droplet dihitung dengan:

$$C_d = \frac{24}{Re_d} \left(1 + \frac{1}{6} Re_d^{\frac{2}{3}} \right) \quad (2.16)$$

2.4.2.2. *Closure models*

Closure models diperlukan untuk menutup sistem persamaan yang tidak tertutup akibat fenomena turbulensi, karena persamaan Navier–Stokes untuk aliran turbulen tidak dapat diselesaikan secara langsung. Dalam penelitian ini, model turbulensi yang digunakan adalah standard k - ϵ , yang merupakan model dua persamaan paling umum dan telah divalidasi secara luas untuk berbagai aplikasi industri. Model ini menambahkan persamaan transport untuk energi kinetik turbulen (k) dan laju disipasi turbulen (ϵ), sehingga memungkinkan prediksi distribusi aliran turbulen secara realistis dengan keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi. Model ini bersifat semi-empiris dan direpresentasikan secara matematis untuk mendekati fenomena fisik yang kompleks.

2.4.2.3. *Specific sub models*

Sub-model spesifik digunakan untuk memodelkan fenomena detail yang diperlukan dalam simulasi agar hasil perhitungan mendekati kondisi nyata. *Continuous phase model* mendeskripsikan perilaku fasa utama (udara), termasuk distribusi aliran dan interaksi termal, sedangkan *discrete phase model* (DPM) digunakan untuk memprediksi gerakan partikel atau droplet air dalam fase kontinu dengan mempertimbangkan gaya, perpindahan panas, dan mekanisme evaporasi. Selain itu, juga diaktifkan *species transport model* untuk memodelkan distribusi komponen fluida dan fenomena perpindahan massa yang terjadi selama proses. Sub-model ini melengkapi sistem persamaan dasar dan *closure model*, sehingga simulasi diharapkan mampu merepresentasikan fenomena fisik secara lebih akurat.

2.4.3. Penggunaan CFD dalam Studi *Cooling Tower*

CFD telah menjadi pendekatan umum dalam analisis performa *cooling tower*, khususnya dalam memahami interaksi kompleks antara aliran udara dan air selama proses pendinginan evaporatif. Dalam studi oleh Kuppili dan Patle (2023), simulasi menggunakan ANSYS Fluent dilakukan pada *cooling tower* tipe *induced draft* dengan variasi sudut inlet udara. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sudut masuk udara memiliki pengaruh signifikan terhadap laju perpindahan panas dan kapasitas evaporasi. Sudut inlet sebesar 30° menghasilkan penurunan temperatur air hingga 22°C , yang menunjukkan peningkatan efisiensi termal secara substansial. Studi ini menegaskan bahwa CFD mampu memvisualisasikan kontur temperatur dan pola aliran yang sulit diperoleh melalui metode eksperimental konvensional.

Keavey dan Agbereghe (2023) menerapkan COMSOL Multiphysics untuk menganalisis distribusi kecepatan, temperatur, kelembapan relatif, dan tekanan udara dalam konfigurasi *forced draft counterflow wet cooling tower*. Simulasi CFD dalam studi ini memungkinkan pemetaan profil aliran udara secara rinci, yang sangat penting untuk optimasi desain agar distribusi udara dan evaporasi air berlangsung merata dan efisien. Hasil simulasi menunjukkan bahwa CFD dapat memprediksi karakteristik termodinamika internal *cooling tower* dengan akurasi tinggi, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan desain dan operasi.

Studi oleh ElDegwy et al. (2022) menggunakan ANSYS Fluent dengan *mesh polyhedral* dan simulasi *steady-state* untuk menyelidiki pengaruh parameter geometris dan kondisi angin terhadap performa *cooling tower*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa fenomena recirculation udara panas di sekitar menara dapat meningkatkan temperatur udara masuk, yang berdampak negatif terhadap efisiensi pendinginan. CFD memungkinkan analisis mendalam terhadap pola aliran dan interaksi termal, serta memberikan rekomendasi desain seperti penyesuaian sudut *windbreak* untuk meminimalkan efek *recirculation* dan meningkatkan performa sistem pendinginan.

Selain aspek geometris dan aliran udara, CFD juga digunakan untuk mengevaluasi pengaruh parameter operasi seperti laju alir udara dan air terhadap kapasitas pendinginan. Simulasi menggunakan model turbulensi k- ϵ dan persamaan energi menunjukkan bahwa peningkatan laju alir udara dapat meningkatkan efisiensi pendinginan, sementara variasi laju alir air dan tinggi *inlet air* memengaruhi distribusi temperatur dan kelembapan dalam menara. Pendekatan ini memungkinkan optimasi kondisi operasi secara kuantitatif untuk mencapai performa maksimal.

Secara keseluruhan, aplikasi CFD dalam analisis *cooling tower* memberikan keunggulan signifikan dalam memahami mekanisme perpindahan panas dan massa yang kompleks, serta dalam mengevaluasi pengaruh parameter desain dan operasi. Dengan kemampuan simulasi tiga dimensi dan visualisasi pola aliran, CFD menjadi alat yang sangat efektif untuk mendukung pengembangan *cooling tower* yang efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Studi-studi terbaru menegaskan bahwa CFD tidak hanya relevan dalam tahap desain awal, tetapi juga dalam evaluasi performa *real-time* dan pengambilan keputusan berbasis data ilmiah.