

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

1.1.1. Pemanfaatan *Geothermal* di Indonesia

Sebagai negara yang berada di jalur cincin api (*ring of fire*), Indonesia memiliki potensi *geothermal* terbesar di dunia yang tersebar pada 276 lokasi di Sumatera, Jawa, Nusa Tenggara, Maluku, dan Papua Barat (Badan Geologi, 2019). Saat ini Indonesia telah berhasil memanfaatkan energi *geothermal* sebagai pembangkit listrik dengan total kapasitas terpasang sebesar 2.653 MW dari total potensi yang dimiliki yaitu 24 GW atau sekitar 11,5%. Dengan kenyataan tersebut, Indonesia menempati posisi ke-2 di dunia dalam hal keberhasilan pemanfaatan energi panasbumi, setelah Amerika Serikat (Huttrer, 2021) sebagaimana ditunjukkan oleh Gambar 1.1 di bawah.



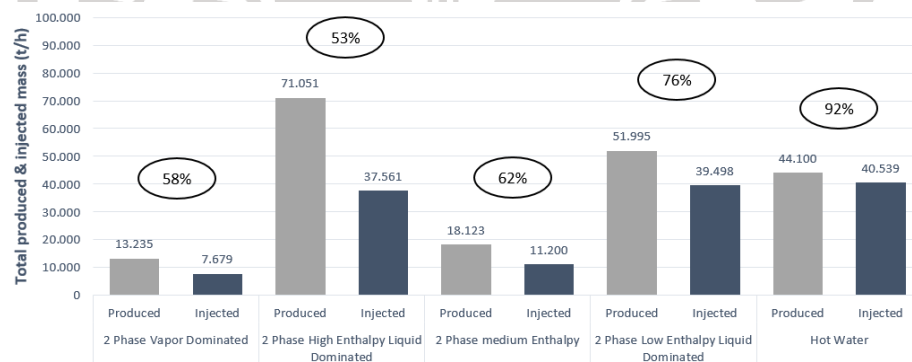
Gambar 1.1. *Top 10 Geothermal countries 2025 – power generation capacity* (www.thinkgeoenergy.com)

1.1.2. Peran Strategis Injeksi dalam Keberlanjutan Reservoir Geothermal

Keberhasilan pengelolaan reservoir panas bumi tidak dapat dilepaskan dari aktifitas reinjeksi. Reinjeksi tidak hanya berperan sebagai sebuah metode untuk membuang air limbah

bekas sisa hasil produksi yang berdampak tidak baik terhadap lingkungan, tetapi lebih dari itu juga turut berpengaruh dalam upaya mengisi kembali massa air ke dalam reservoir (*mass recovery*) yang pada akhirnya akan turut andil dalam memelihara keberlanjutan eksploitasi panasbumi (Zahratul, Kamila, 2021).

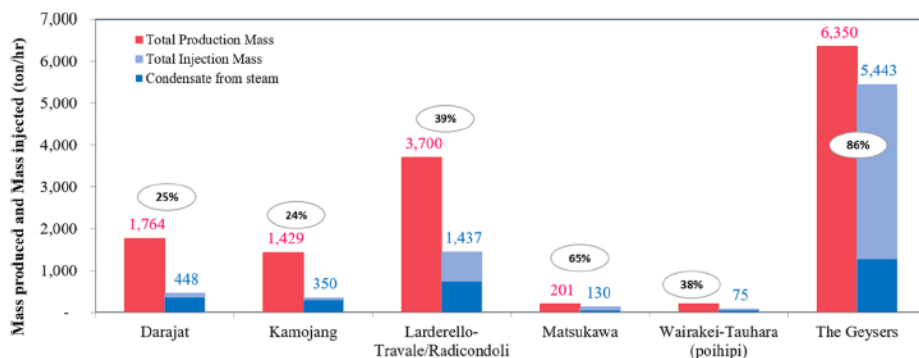
Selain titik injeksi yang tepat, jumlah massa air yang diinjeksikan ke sumur merupakan hal penting yang perlu dipertimbangkan dalam usaha menjaga *sustainability* lapangan *geothermal*. Pada bermacam tipe lapangan *geothermal*, rasio massa air yang diinjeksikan dibandingkan dengan massa uap yang diambil, memiliki angka yang berbeda-beda (Diaz, et al 2015). Dari data yang dikumpulkan dari 69 lapangan panas bumi di dunia dengan berbagai karakteristik reservoir, ditinjau dari total massa fluida *geothermal* yang diekstrak ke permukaan di lapangan dominasi uap, setidaknya 58% nya diinjeksikan kembali ke reservoir. Pada lapangan dua fasa-dominasi air dengan *enthalpy* yang tinggi perbandingannya adalah 53%, pada lapangan dua fasa *enthalpy* menengah dan dominasi air rasionya menjadi 62% dan pada lapangan dua fasa dominasi air-*enthalpy* rendah rasionya menjadi 76%. Detail mengenai persentase total massa injeksi terhadap total massa terproduksi ditunjukkan pada Gambar 1.2.



Gambar 1.2. Persentase total massa injeksi dibandingkan total massa terproduksi pada berbagai tipe reservoir panas bumi (kamila et al. 2021)

Lapangan panas bumi Kamojang merupakan satu diantara sedikit lapangan di dunia yang memiliki karakteristik reservoir *vapour dominated*. Sebagaimana lapangan dengan karakteristik sejenis, persentase injeksi di lapangan Kamojang tergolong sangat kecil. Dari data operasional yang dapat dihimpun, hanya sekitar 24% dari total massa air yang terproduksi yang pada akhirnya dapat diinjeksikan kembali. Angka ini relatif cukup kecil jika dibandingkan dengan data persentase rata-rata pada tipe reservoir yang sejenis di seluruh dunia yaitu sebesar 58%. Oleh karena itu, pada skala waktu operasional yang lebih panjang, besar kemungkinan kekurangan massa injeksi dapat

mengganggu operasional dengan munculnya berbagai permasalahan seperti tingginya laju penurunan produksi dan *decline* tekanan sumur yang lebih cepat. Perbandingan total mass yang diproduksi dengan total massa yang diinjeksikan pada lapangan gothermal dominasi uap dapat dilihat pada Gambar 1.3 berikut ini.



Gambar 1.3. Persentase total masa injeksi dibandingkan total masa terproduksi pada berbagai lapangan dominasi uap di dunia (kamila et al. 2021)

1.1.3. Peran Kritis *Cooling tower* dalam Penyediaan Air Injeksi

Dalam sistem pembangkitan panas bumi, *cooling tower* berfungsi sebagai komponen vital dalam siklus termal, khususnya dalam proses kondensasi uap menjadi air yang akan digunakan kembali sebagai fluida injeksi. Pada lapangan *vapor-dominated*, air injeksi sebagian besar berasal dari kondensat hasil pendinginan uap bekas turbin. Proses pendinginan ini berlangsung di dalam menara pendingin, di mana terjadi perpindahan panas dan massa yang kompleks antara udara dan air. Salah satu tantangan utama dalam operasi *cooling tower* adalah kehilangan air akibat penguapan (*evaporation loss*), yang secara langsung mengurangi volume air yang tersedia untuk reinjeksi. Oleh karena itu, desain dan pengoperasian *cooling tower* harus dilakukan secara cermat untuk meminimalkan water losses dan menjamin ketersediaan air injeksi yang memadai.

1.1.4. Relevansi Penggunaan Metoda CFD dalam Analisis Kinerja *Cooling Tower*

Pemanfaatan *computational fluid dynamics* (CFD) pada kasus *cooling tower* telah menarik minat para ilmuwan pada beberapa tahun terakhir, dimana CFD menawarkan diri sebagai tools yang cukup andal dalam memberikan pemahaman dinamika fluida yang melibatkan proses perpindahan panas yang kompleks baik di pembangkit listrik ataupun dunia industri lainnya. CFD telah muncul sebagai metoda yang berharga dalam menganalisa pola aliran dan karakteristik thermal yang rumit di *cooling tower* (Al-baghdadi, 2020). Melalui pengembangan model matematis yang spesifik dan simulasi numeris, CFD dapat memberikan wawasan tentang interaksi kompleks antara aliran

udara, aliran air, dan perpindahan panas yang memengaruhi kinerja *cooling tower*. Informasi ini dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan desain, pengoperasian, dan pemeliharaan *cooling tower* sehingga dapat memberikan keuntungan teknis dan mengurangi dampak lingkungan. Para peneliti telah menunjukkan kemampuan CFD untuk secara akurat memprediksi distribusi *temperature*, pola aliran udara, dan parameter penting lainnya dalam menara pendingin, yang mungkin sulit diukur secara eksperimental. Selain itu, simulasi CFD dapat digunakan untuk mengeksplorasi dampak modifikasi desain dan perubahan operasional terhadap kinerja *cooling tower*, sehingga memungkinkan pengambilan keputusan dan optimalisasi sistem ini secara lebih cepat (Molinero-Hernandez et al., 2021).

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, terdapat beberapa permasalahan utama yang menjadi fokus dalam penelitian ini, yaitu:

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur air panas pada inlet terhadap kinerja termal dan kehilangan air akibat penguapan pada *cooling tower* tipe *induced draft-counter flow*?
2. Bagaimana pengaruh perubahan *heat load* terhadap *evaporation loss*?
3. Bagaimana pengaruh variasi kecepatan udara masuk terhadap besarnya *evaporation loss* dan efisiensi termal sistem pendinginan?
4. Sejauh mana akurasi metode *computational fluid dynamics* (CFD) dalam memodelkan fenomena perpindahan panas dan massa di dalam *cooling tower* dibandingkan dengan pendekatan empiris seperti metode ASHRAE?
5. Bagaimana hasil simulasi CFD dapat digunakan untuk mendukung optimasi desain dan pengoperasian *cooling tower* guna meminimalkan kehilangan air dan meningkatkan efisiensi sistem pendinginan di PLTP?

1.3. Tujuan dan Manfaat Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur air panas pada inlet terhadap kinerja termal dan kehilangan air akibat penguapan pada *cooling tower* tipe *induced draft-counter flow*.
2. Mengkaji dampak perubahan *heat load* terhadap *evaporation loss*.
3. Mengevaluasi pengaruh kecepatan udara masuk terhadap besarnya *evaporation loss* dan efisiensi termal sistem *cooling tower*.

4. Membandingkan hasil estimasi *evaporation loss* dan parameter kinerja lainnya antara metode empiris ASHRAE dan simulasi numerik berbasis *computational fluid dynamics* (CFD), serta data pada saat *performance test*.

Adapun manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai pengaruh parameter operasional terhadap performa termal dan *evaporation loss* pada sistem *cooling tower*.
2. Menyediakan data dan informasi berbasis simulasi numerik yang dapat digunakan sebagai referensi dalam perancangan dan pengoperasian *cooling tower* yang lebih efisien dan berkelanjutan.
3. Menunjukkan keandalan metode CFD sebagai alat bantu analisis dan optimasi sistem pendinginan dalam konteks pembangkit listrik tenaga panas bumi.
4. Mendukung upaya peningkatan efisiensi penggunaan air dan konservasi sumber daya pada sistem reinjeksi, khususnya di lapangan panas bumi dengan karakteristik *vapor-dominated reservoir*.

1.4. Orisinalitas Penelitian

Berdasarkan table 1.1 dapat diidentifikasi bahwa penelitian yang akan dilakukan merupakan kajian baru yang secara khusus memfokuskan pada analisis performa dan *evaporation loss* pada *geothermal wet cooling tower* bertipe *induced draft-counter flow*. Penelitian terdahulu umumnya hanya menyoroti tentang performa termal, perilaku aliran, atau fenomena *plume* dan belum banyak ditemui penelitian yang mengkaji hubungan antara variasi titik operasional dan lingkungan terhadap *evaporation loss* yang secara komprehensif terutama pada *cooling tower* yang berada di industri geothermal. Oleh karena itu, penelitian ini dirancang untuk mengevaluasi berbagai kondisi operasi guna mengetahui titik operasi yang optimal, yakni kondisi yang mampu meminimalkan *evaporation loss* tanpa mengorbankan performa pendinginan, yang direpresentasikan melalui parameter *cooling tower effectiveness*.

Selain itu, penelitian ini juga dilengkapi dengan tinjauan hukum-hukum termodinamika, seperti keseimbangan energi dan prinsip konservasi massa, untuk memperkuat validitas analisis dan menjelaskan hubungan fundamental antara perpindahan panas, massa air yang menguap, dan kinerja sistem *cooling tower*. Pendekatan termodinamika ini menjadi penting mengingat

mekanisme pendinginan pada *wet cooling tower* sangat ditentukan oleh interaksi simultan antara proses evaporasi, konveksi, dan perpindahan panas sensibel.

Metodologi yang digunakan merupakan simulasi *computational fluid dynamics* (CFD) dengan model 3 dimensi serta memanfaatkan data primer dan sekunder di lapangan sebagai dasar perumusan kondisi operasi aktual. Model sistem yang digunakan adalah model eksisting yang diadopsi dari desain awal PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi) pada saat proyek *Engineering, Procurement, Construction & Commissioning* (EPCC), sehingga diharapkan memenuhi kriteria representatif terhadap kondisi nyata. Dengan demikian, hasil simulasi diharapkan tidak hanya memberikan gambaran teoretis, tetapi juga memiliki relevansi praktis bagi pengoperasian *cooling tower* di lingkungan PLTP.



Tabel 1.1 Orisinalitas Penelitian

No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
1	(Blecich, et al., 2018)	<i>Numerical Investigation Of Heat and Mass Transfer Inside A Wet Cooling tower</i>	- Objek studi ini adalah <i>cooling tower</i> tipe forced draft di industri petrokima. - Penelitian dilakukan dengan simulasi CFD menggunakan pendekatan 1 dimensi sehingga kurang mampu menangkap kompleksitas aliran. - Penelitian ini menggunakan pendekatan Eulerian-Lagrangian untuk memodelkan interaksi antara fase gas dan cair, serta mempertimbangkan efek <i>drift</i>, <i>plume formation</i>, dan distribusi kelembapan.	- Objek yang diteliti dalam penelitian ini adalah <i>induced draft wet cooling tower</i> aplikasi pada industri geothermal. - Penelitian dilakukan dengan menggunakan metoda CFD dengan pendekatan model 3 dimensi sehingga memberikan gambaran yang lebih riil. - Penelitian ini menggunakan pendekatan Discrete Phase Model (DPM) dengan <i>break up droplet</i> untuk memodelkan interaksi antara fasa gas dan cair dengan mempertimbangkan efek perubahan titik operasional dan menitikberatkan pada pengaruh terhadap kinerja pendinginan dan <i>evaporation loss</i>.
2	(Zargar, et al., 2023)	<i>A hybrid cooling tower model for plume abatement and performance analysis.</i>	- Penelitian ini berfokus pada hubungan keadaan lingkungan dan kondisi operasi pada <i>hybrid cooling tower</i> terhadap <i>visibilitas plume</i> dan performa pendinginan. - Penelitian menggunakan metoda pemodelan dengan 1 dimensi pada <i>cooling</i>	- Penelitian berfokus pada hubungan perubahan kondisi operasional dan lingkungan pada <i>geothermal induced draft – counter flow cooling tower</i> terhadap kinerja pendinginan dan <i>evaporation loss</i>. - Penelitian menggunakan metoda CFD dengan memodelkan secara 3

			tower tipe <i>counter flow</i> dengan mengintegrasikan model <i>effectiveness-NTU</i> untuk seksi <i>dry cooling</i> dan model plume turbulen. • Hasil dari penelitian menyoroti tentang <i>trade off</i> antara kapasitas pendinginan, pengurangan uap air, konsumsi air, dan daya yang diperlukan pada <i>cooling tower fan</i>.	dimensi sehingga mampu menangkap kompleksitas aliran dan interaksi termal dalam <i>cooling tower</i>.
No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
3	(Liu, Lei., et al., 2023)	<i>Study on heat transfer and water saving characteristics of a new cooling tower condensation module.</i>	• Penelitian ini mengkaji tentang efektifitas penggunaan <i>condensation module</i> yang baru untuk meningkatkan perpindahan kalor, mengurangi pembentukan <i>plume</i> dan mengurangi <i>water loss</i> dan membandingkan dengan modul konvensional. • Studi dilakukan dengan simulasi numeris CFD 2D dengan membandingkan dengan data hasil eksperimen di laboratorium dengan melakukan analisa terhadap perbedaan <i>temperature</i> inlet dan outlet air.	• Penelitian mengkaji tentang kinerja <i>cooling tower</i> dan <i>evaporation loss</i> pada variasi kondisi operasional seperti mass rate, suhu air yang masuk, suhu udara sekitar, serta kecepatan udara yang memasuki <i>cooling tower</i>. • Penelitian menggunakan metoda CFD dengan memodelkan secara 3D sehingga mampu menangkap kompleksitas aliran dan interaksi termal dalam <i>cooling tower</i>.

4	(Deng, Weipeng et al., 2023)	<i>Impact mechanism of rhombus module on plume abatement and water saving of mechanical draft wet cooling tower.</i>	• Penelitian ini menggunakan metoda eksperimental dengan membandingkan antara mechanical draft cooling tower (MCT) biasa, retrofit MCT, dan Rhombus Module. • Eksperimen dilakukan berfokus pada mengatasi jumlah plume dan kinerja pendinginan dengan variasi relative humidity, temperatur air, dan jumlah air sirkulasi.	• Penelitian ini mengambil model eksisting yaitu <i>geothermal induced draft counter flow cooling tower</i> dengan metode CFD model 3D. • Penelitian berfokus pada kinerja <i>cooling tower</i> dan <i>evaporation loss</i> pada variasi kondisi operasional seperti mass rate, suhu air yang masuk, suhu udara sekitar, serta kecepatan udara yang memasuki <i>cooling tower</i>.
5	(Deng et. al., 2023)	<i>New method to decrease the air recirculation of mechanical draft wet cooling tower group by increasing height of fan duct.</i>	• Penelitian ini menggunakan metoda CFD dengan model 3D pada <i>mechanical draft wet cooling tower</i> (MCT) berfokus pada fenomena resirkulasi udara panas di <i>cooling tower</i>. Variasi geometri berupa ketinggian <i>fan duct</i> digunakan untuk membuktikan pengaruhnya terhadap kapasitas pendinginan.	• Penelitian ini mengambil model eksisting yaitu <i>geothermal induced draft counter flow cooling tower</i> dengan metode CFD model 3D. • Penelitian ini berfokus pada kinerja <i>cooling tower</i> dan <i>evaporation loss</i> pada variasi kondisi operasional seperti <i>mass rate</i>, suhu air yang masuk, suhu udara sekitar, serta kecepatan udara yang memasuki <i>cooling tower</i>.
No	Peneliti	Judul Penelitian	Hasil Penelitian	Gap Analysis
6	(Shublaq et al., 2020)	<i>Experimental analysis of water evaporation losses in cooling towers using Filters.</i>	• Penelitian ini menggunakan metoda eksperimental yang dilakukan pada <i>wet cooling tower</i> (MCT) dengan melakukan variasi tipe filter (<i>metal, penel alumunium</i>,	• Berbeda dengan Shublaq dkk, penelitian ini menggunakan method computational fluid dynamics (CFD) untuk melakukan analisa <i>evaporation loss</i>, dengan

			<i>fiberglass, pleated pre filter, dan fiberglass pocket filter) terhadap water loss.</i>	tetap mempertimbangkan kinerja <i>cooling tower</i>. • Variasi kondisi operasional dilakukan untuk mendapatkan <i>trade off</i> antara <i>water losses</i> dengan <i>performa cooling tower</i>.
--	--	--	--	---

