



Pengaruh Modifikasi Pipa Pendingin Terhadap Efektivitas Induced Draft Cooling Tower LBC-50

The Effect Of Cooling Pipe Modification On The Effectiveness Of The Induced Draft Cooling Tower LBC-50

Muhammad Fairuz Naufal¹, Amri Abdulah^{1,*}, Yadi Heryadi¹, Apang Djafar Shieddieque¹, Dede Ardi Rajab¹, Sri Suhartini²

¹ Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukancana, Purwakarta, Indonesia

² Program Studi Manajemen Industri, Sekolah Tinggi Teknologi Wastukancana, Purwakarta, Indonesia

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peningkatan kinerja sistem induced draft cooling tower melalui modifikasi pada jalur pipa distribusi air serta evaluasi performa termal dan hidraulik sebelum dan sesudah modifikasi. Permasalahan utama yang dihadapi pada sistem awal adalah efektivitas pendinginan yang masih rendah akibat distribusi aliran air yang tidak merata dan keterbatasan perpindahan panas antara udara dan air di dalam menara pendingin. Oleh karena itu, dilakukan perancangan ulang sistem pipa distribusi dengan tujuan meningkatkan keseragaman aliran, memperbesar area kontak udara-air, serta meminimalkan kehilangan panas yang tidak efisien. Pengujian dilakukan dengan mengukur suhu masuk dan keluar air pada kondisi operasi yang sama, yaitu suhu masuk sebesar 38 °C. Hasil pengukuran menunjukkan adanya penurunan suhu air keluar dari 33,78 °C sebelum modifikasi menjadi 28,95 °C setelah modifikasi. Nilai range meningkat dari 5,17 °C menjadi 9,12 °C, sedangkan approach menurun dari 4,68 °C menjadi 2,61 °C, yang menunjukkan bahwa proses pendinginan berlangsung lebih efektif dan mendekati kondisi ideal. Selain itu, kapasitas pendinginan mengalami peningkatan signifikan dari 21.717,4 kW menjadi 61.515,1 kW, yang berarti cooling tower hasil modifikasi mampu membuang panas dalam jumlah lebih besar dan mendukung proses produksi dengan beban pendinginan tinggi. Efektivitas sistem juga meningkat dari 52,45% menjadi 77,58%, menandakan peningkatan efisiensi perpindahan panas akibat perbaikan distribusi fluida. Di sisi lain, total head loss meningkat dari 39,11 m menjadi 63,71 m, yang menunjukkan adanya tambahan resistansi aliran, namun masih dalam batas yang dapat diterima. Secara keseluruhan, hasil penelitian membuktikan bahwa modifikasi jalur pipa pada sistem induced draft cooling tower mampu meningkatkan efektivitas, kapasitas pendinginan, dan kinerja termal secara signifikan, sehingga rancangan ini dapat diimplementasikan untuk peningkatan efisiensi sistem pendingin industri berskala besar.

Kata Kunci: induced draft cooling tower, modifikasi jalur pipa, efektivitas, kapasitas pendinginan, head loss.

Abstract: This study aims to analyze the performance enhancement of an induced draft cooling tower through modifications to the water distribution piping line, as well as to evaluate the thermal and hydraulic performance before and after modification. The initial system exhibited relatively low cooling effectiveness due to uneven water distribution and limited heat transfer between air and water within the tower. Therefore, the piping layout was redesigned to improve flow uniformity, enlarge the air-water contact area, and minimize heat losses, thereby enhancing overall cooling efficiency. The experimental tests were conducted under identical operating conditions with an inlet water temperature of 38 °C. The results showed that the outlet water temperature decreased from 33.78 °C (before modification) to 28.95 °C (after modification). The range increased from 5.17 °C to 9.12 °C, while the approach decreased from 4.68 °C to 2.61 °C, indicating a more effective cooling process approaching ideal conditions. Furthermore, the cooling capacity showed a substantial increase from 21,717.4 kW to 61,515.1 kW, signifying that the modified cooling tower can dissipate a greater amount of heat and support higher cooling demands in industrial operations. In addition, the system effectiveness improved from 52.45% to 77.58%, demonstrating a significant enhancement in heat transfer efficiency as a result of improved fluid distribution. On the other hand, the total head loss increased from 39.11 m to 63.71 m, indicating higher flow resistance due to the new configuration, but it remained within acceptable limits. Overall, the study concludes that modifying the piping line in the induced draft cooling tower significantly improves thermal performance, cooling effectiveness, and capacity, making the redesigned configuration a viable approach to increase the efficiency of large-scale industrial cooling systems.

Keywords: induced draft cooling tower, piping line modification, effectiveness, cooling capacity, head loss.

* Corresponding author: amri@wastukancana.ac.id

<https://doi.org/10.51132/teknologika.v15i2.540>

Received: 13-10-2025

Accepted: 14-10-2025

Available online: 30-11-2025

1. Pendahuluan

Teknologi pendinginan berbasis air menjadi solusi utama untuk menangani beban panas besar di banyak industri karena kapasitas panas spesifik air yang jauh lebih tinggi dibandingkan udara, sehingga transfer panas melalui media cair umumnya lebih efisien. Cooling tower sebagai penukar panas evaporatif memanfaatkan kontak langsung antara air dan udara, di mana sebagian kecil air menguap dan membawa entalpi laten, sehingga menurunkan suhu sisa air secara lebih efektif daripada pendinginan non-evaporatif [1]. Kinerja cooling tower sangat dipengaruhi oleh desain internal (mis. fill, nozzle/distributor) dan sistem distribusi air. Beberapa studi eksperimental dan numerik menunjukkan bahwa variasi panjang fill dan konfigurasi sistem distribusi dapat meningkatkan performa termal menara hingga puluhan persen, sedangkan distribusi air yang tidak seragam menyebabkan penurunan efisiensi yang signifikan. Optimalisasi pola penyemprotan dan pembagian zona kerja (spray/fill/rain zones) telah terbukti meningkatkan pertukaran panas secara keseluruhan [2].

Selain aspek termal, aspek hidraulik (piping layout, jumlah siku, diameter, dan head loss) juga menentukan efektivitas sistem. Perubahan jalur pipa dan komponen hidraulik dapat meningkatkan rugi-rugi tekanan (head loss), yang berdampak pada kebutuhan tenaga pompa dan laju sirkulasi; di sisi lain, perbaikan distribusi air (mengurangi *bypass* dan meningkatkan uniformitas) sering kali memberi manfaat netto terhadap kapasitas pendinginan meskipun ada kenaikan head loss. Penelitian yang meninjau keseimbangan antara rugi tekanan dan distribusi air menekankan perlunya pendekatan sistemik (termal + hidraulik) saat merancang atau memodifikasi sirkuit pendingin [3].

Pendekatan numerik dan eksperimental terkini menyediakan alat untuk memprediksi dan mengoptimalkan distribusi air dalam menara skala besar. Model termal-hidraulik yang menggabungkan mekanika aliran, perpindahan panas konvektif-evaporatif, dan pola semprotan memungkinkan evaluasi sensitivitas parameter desain (mis. posisi nozzle, pembagian sektor, panjang fill) terhadap *range*, *approach*, efektivitas, dan head loss total. Studi-studi terbaru menggunakan simulasi untuk merumuskan rekomendasi desain yang konkret untuk meningkatkan efisiensi operasional [4]. Berdasarkan tinjauan literatur tersebut, jelas bahwa perubahan pada jalur distribusi/pipa termasuk penyetaraan debit antar cabang, penempatan valve/ nozzle, dan pengurangan dead leg atau elbow yang tidak perlu berpotensi besar meningkatkan uniformitas aliran air ke fill dan akibatnya memperbaiki kemampuan pendinginan menara. Namun, setiap intervensi hidraulik harus dikaji secara holistik karena trade-off antara peningkatan distribusi air dan kenaikan head loss dapat mempengaruhi konsumsi energi pompa dan biaya operasi [5]. Oleh karena itu, penelitian ini menempatkan fokus pada modifikasi jalur pipa (line modification) dan mengevaluasi dampaknya secara kuantitatif terhadap parameter performa cooling tower (range, approach, efektivitas) sekaligus perubahan head loss dan karakteristik aliran.

Penelitian ini dilakukan untuk memperbaiki sistem distribusi aliran air pendingin pada induced draft cooling tower tipe LBC 50 melalui modifikasi jalur pipa (line modification). Tipe ini menggunakan satu atau beberapa kipas di bagian atas menara untuk menarik udara dari bawah ke atas, sehingga terjadi aliran berlawanan antara udara dan air. Mekanisme ini memungkinkan air yang lebih dingin di bagian bawah bersinggungan dengan udara yang lebih kering, sementara air yang lebih hangat di bagian atas bertemu dengan udara yang lebih lembap, menghasilkan efisiensi perpindahan panas yang lebih tinggi. Komponen utama dari sistem ini meliputi water basin sebagai penampung air pendingin, fan dan motor fan untuk mengatur sirkulasi udara, serta filling material sebagai media peningkatan kontak antara udara dan air.

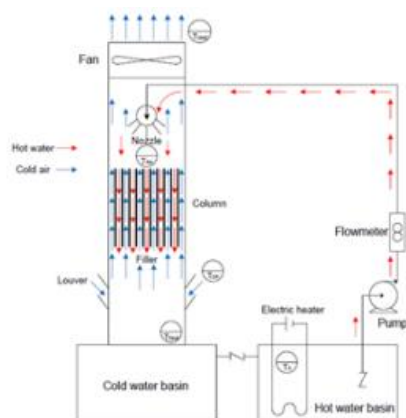
Kebaruan (novelty) dari penelitian ini terletak pada modifikasi sistem distribusi aliran air pendingin yang dirancang untuk memperbaiki pola kontak udara–air di dalam menara. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas perpindahan panas, tetapi juga memperbaiki kestabilan suhu operasi dan efisiensi energi sistem pendingin. Analisis kinerja dilakukan dengan mengevaluasi parameter range, approach, dan efektivitas sebelum dan sesudah modifikasi, untuk menentukan sejauh mana perubahan desain mampu meningkatkan performa cooling tower secara menyeluruh.

2. Metodologi

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis peningkatan kinerja induced draft cooling tower melalui serangkaian modifikasi sistem dan evaluasi komparatif. Metodologi penelitian terdiri atas beberapa tahapan utama, yaitu modifikasi sistem cooling tower, pengujian eksperimental, serta analisis kinerja sebelum dan sesudah modifikasi. Pada tahap awal, dilakukan pengumpulan data operasional dari sistem cooling tower yang ada, meliputi suhu air masuk dan keluar, suhu udara lingkungan, kelembapan relatif, serta laju aliran massa air. Konfigurasi fisik cooling tower (jenis kipas, media isian (fill media), drift eliminator, dan sistem distribusi air) juga didokumentasikan sebagai acuan dasar sebelum dilakukan modifikasi.

2.1 Modifikasi Cooling Tower

Tahap modifikasi dilakukan dengan melakukan perancangan ulang pada jalur dan sistem distribusi pendingin untuk meningkatkan keseragaman aliran udara dan efisiensi perpindahan panas. Modifikasi spesifik meliputi penyesuaian tata letak pipa distribusi air, pengaturan ulang posisi nozzle semprotan, serta optimasi luas kontak antara udara dan air pada bagian fill. Proses modifikasi dilaksanakan dengan tetap mempertahankan dimensi menara dan spesifikasi kipas agar perbandingan kinerja sebelum dan sesudah modifikasi bersifat adil dan terukur.



Gambar 1. Skema cooling tower



Gambar 2. Desain modifikasi pipa

Proses modifikasi pada sistem jalur pipa cooling tower memerlukan beberapa komponen utama yang disesuaikan dengan kebutuhan sistem untuk memastikan peningkatan kinerja pendinginan berjalan optimal. Pemilihan bahan dilakukan dengan mempertimbangkan kekuatan, ketahanan terhadap korosi, serta kemampuan menahan tekanan dan suhu operasi pada sistem pendingin industri. Rincian bahan yang digunakan dalam proses modifikasi ditunjukkan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1. Material kebutuhan modifikasi jalur pipa

No	Nama Bahan	Ukuran	Jumlah
1	Pipa galvanis	2 inch	1 Batang
2	Pipa galvanis	4 inch	1 Batang
3	Elbow stainless	4 inch	2 buah
4	Butterfly valve	4 inch	1 buah
5	Ball valve	2 inch	1 buah
7	Gasket	2 inch	2 buah
8	Baut dan mur stainless	M12	8 buah

Dari Tabel 1 dapat dilihat bahwa bahan utama yang digunakan meliputi pipa galvanis berukuran 2 dan 4 inci sebagai saluran utama distribusi air pendingin. Penggunaan pipa galvanis dipilih karena memiliki ketahanan terhadap karat dan tekanan fluida yang cukup tinggi. Selain itu, digunakan elbow stainless untuk perubahan arah aliran air agar sesuai dengan rancangan jalur baru, serta valve (butterfly valve dan ball valve) yang berfungsi untuk mengatur serta mengontrol laju aliran air dalam sistem.

Komponen tambahan seperti gasket digunakan untuk memastikan sambungan antar pipa tetap rapat dan tidak terjadi kebocoran, sedangkan baut dan mur stainless M12 berfungsi untuk memperkuat sambungan mekanis antar komponen. Seluruh bahan ini dipilih berdasarkan pertimbangan teknis dan keandalan dalam lingkungan kerja yang memiliki paparan suhu tinggi dan kelembapan tinggi, sehingga modifikasi sistem dapat beroperasi secara stabil dan efisien dalam jangka panjang.

2.2 Prosedur Eksperimen

Setelah proses modifikasi selesai, dilakukan pengujian eksperimental dengan kondisi lingkungan dan operasional yang serupa dengan sistem awal. Parameter yang diukur meliputi suhu air masuk dan keluar, suhu udara dry-bulb dan wet-bulb, serta laju aliran massa udara dan air. Pengukuran dilakukan menggunakan sensor yang telah dikalibrasi. Setiap pengujian diulang sebanyak tiga kali untuk meminimalkan kesalahan acak, dan nilai rata-ratanya digunakan dalam analisis. Parameter kinerja seperti cooling range, temperature approach, efektivitas, dan efisiensi termal dihitung untuk kondisi sebelum dan sesudah modifikasi. Analisis dilakukan menggunakan persamaan neraca panas standar pada sistem cooling tower. Persentase peningkatan kinerja dihitung berdasarkan perbandingan hasil pengujian setelah modifikasi terhadap kondisi awal.

Kinerja *cooling tower* dapat dievaluasi dari metode *range* dan *approach*, efektivitas operasi pada nilai rancangan, identifikasi area pemborosan energi, dan juga untuk sarana perbaikan.



Gambar 3. Tipe induced draft cooling tower



Gambar 4. Range dan approach

Melihat dari Gambar 3. Efektivitas menara pendingin (dalam persentase) merupakan rasio antara jangkauan dengan jangkauan ideal, yaitu perbedaan antara temperatur masuk air pendingin dengan temperatur bola basah sekitar, atau dengan kata lain. *Range* merupakan perbandingan temperatur dari temperatur air yang masuk *cooling tower* dengan temperatur air yang keluar *cooling tower* atau perbandingan antara temperatur air yang bersuhu panas dengan temperatur air yang bersuhu dingin. Lalu *approach* merupakan perbandingan antara suhu air yang keluar *cooling tower* dengan suhu lingkungan atau disebut juga *wet bulb* (bola basah). Metode *approach* dan *range* menggunakan peristiwa utama berupa konveksi paksa dengan mengandalkan peristiwa penyerapan panas yang dipaksa oleh udara lingkungan sekitar, laju perpindahan panas suatu benda sebanding dengan beda temperatur antara benda dengan fluida sekelilingnya.

2.2.1. Range Cooling Tower

Range adalah pengurangan antara temperatur air yang masuk *cooling tower* dengan temperatur air yang keluar *cooling tower*. Jika nilai *rangeny* yang besar dapat disimpulkan *cooling tower* sudah bisa mendinginkan temperatur air secara optimal dan kerja pendinginannya yang baik :

$$Range(^{\circ}C) = T_{inlet}(^{\circ}C) - T_{outlet}(^{\circ}C) \quad (1)$$

2.2.2. Approach Cooling Tower

Approach adalah rasio perbandingan dari temperatur *wet bulb* dengan temperatur air keluar *cooling tower*. Apabila semakin rendah atau temperatur air yang keluar *cooling tower* mendekati temperatur *wet bulb* maka dapat dikatakan bahwa nilai *approach* adalah baik dan sebaliknya apabila perbandingan temperaturnya semakin tinggi maka dapat dikatakan bahwa nilai *approach* pada saat itu kurang baik. Rumus untuk mencari nilai *approach* yaitu :

$$Approach(^{\circ}C) = T_{outlet}(^{\circ}C) - T_{wb}(^{\circ}C) \quad (2)$$

2.2.3. Efektivitas Cooling Tower

Efektivitas adalah selisih antara nilai *range* dengan nilai *range + approach*, dengan kata lain temperatur air masuk *cooling tower* dengan temperatur bola basah. Apabila semakin tinggi maka dapat dikatakan bahwa nilai efektivitasnya adalah baik, dan sebaliknya apabila selisihnya rendah atau hampir mendekati maka dapat dikatakan bahwa nilai efektivitasnya kurang baik.

$$\text{Efektivitas et}(\%) = \frac{Range}{(Range + Approach)} \times 100\% \quad (3)$$

2.2.4. Kapasitas Pendinginan Cooling Tower

Kapasitas pendinginan merupakan panas yang dibuang dalam kkal/jam atau kW, sebagai hasil dari kecepatan aliran masa air, panas spesifik dan perbedaan suhu . Semakin tinggi perubahan suhu maka kapasitas pendinginan semakin tinggi. Nilai kapasitas yang tinggi menunjukkan baik tidaknya kemampuan pendinginan *Cooling Tower* . Kapasitas pendinginan secara teori dianggap optimal yaitu 1383,58 kJ/s . Kapasitas pendinginan dapat dihitung dengan rumus [6,7] :

$$Q_{ct} = \dot{m} \times c \times \Delta T \quad (4)$$

Keterangan :

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

c = kalor spesifik air (J/kg $^{\circ}C$)

ΔT = perubahan suhu ($^{\circ}C$)

2.2.5. Head loss

Head loss adalah penurunan energi total fluida yang mengalir pada instalasi perpipaan akibat dari adanya unsur-unsur kerugian dan kerugian *head* aliran fluida yang melalui pipa akan selalu mengalami kerugian *head* [8]. Hal ini disebabkan oleh gesekan yang terjadi antara fluida dengan dinding pipa atau perubahan kecepatan yang dialami oleh aliran fluida.

2.2.6. Head Loss Mayor

$$hf = f \times \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

Keterangan :

hf = head loss mayor (m)

f = faktor gesekan (dimensional)

L = panjang pipa (m)
D = diameter pipa (m)
 v = kecepatan fluida (m/s)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Untuk aliran laminar dan turbulen terdapat rumus yang berbeda. Sebagai patokan apakah suatu aliran itu laminar atau turbulen, dipakai bilangan *Reynolds* [6].

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (6)$$

Re = bilangan *reynolds*
 ρ = densitas air (kg/m^3)
 v = kecepatan fluida (m/s)
D = diameter pipa (m)
 μ = viskositas dinamis fluida (kg/m.s)

2.2.7. Head Loss Minor

Head loss minor merupakan unsur hilang tekanan yang diakibatkan karena adanya aksesoris perpipaan seperti belokan, percabangan, pengecilan atau pembesaran, *strainer*, *valve*, dan lain-lain. Unsur *head loss* minor dapat dihitung menggunakan rumus yang sama, yang membedakan setiap unsur *losses* ada pada koefisiennya [8].

$$hm = K \times \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Keterangan :

hm = *head loss* minor (m)
K = koefisien kerugian *head* minor (dimensional)
 v = kecepatan fluida (m/s)
 g = percepatan gravitasi (m/s^2)

Head loss total didapatkan dari hasil penjumlahan *head loss* mayor dan *head loss* minor ditunjukkan pada rumus sebagai berikut [8].

$$\Delta H_{total} = \Sigma hf + \Sigma hm \quad (8)$$

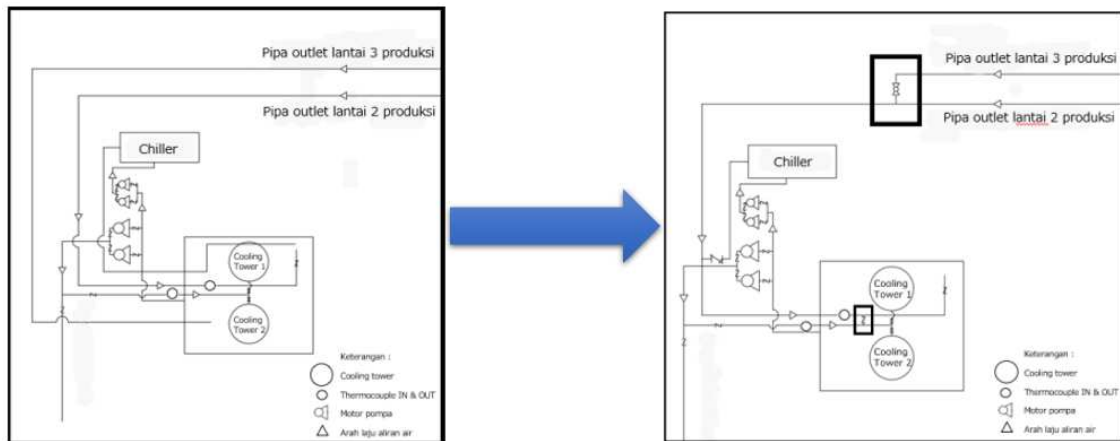
Keterangan :

ΔH_{total} = *head loss* total (m)
 Σhf = jumlah *head loss* mayor (m)
 Σhm = jumlah *head loss* minor (m)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil Modifikasi jalur pipa

Untuk meningkatkan efektivitas proses pendinginan, dilakukan modifikasi pada sistem distribusi aliran air pada induced draft cooling tower. Modifikasi ini difokuskan pada jalur pipa yang mengalirkan air dari proses produksi menuju unit cooling tower, dengan tujuan memperbaiki distribusi aliran dan memastikan kontak udara–air berlangsung lebih optimal di dalam menara pendingin. Sebelum dilakukan perubahan, sistem pipa memiliki konfigurasi yang menyebabkan sebagian besar air hasil proses produksi langsung masuk ke tangki penampung tanpa melewati area pertukaran panas secara maksimal.



Gambar 1. Rangkaian pipa sebelum dan sesudah modifikasi

Setelah dilakukan modifikasi, jalur pipa didesain ulang agar aliran air dari lantai produksi dialirkan lebih merata menuju dua unit cooling tower secara seimbang. Penambahan sambungan dan pengaturan ulang posisi valve serta arah aliran air memungkinkan air hasil proses produksi melewati area pendinginan dengan kontak udara yang lebih luas. Perubahan ini secara signifikan meningkatkan efisiensi perpindahan panas dan menurunkan suhu air keluar dari cooling tower. Selain itu, modifikasi ini juga memperbaiki kestabilan tekanan aliran dan mengurangi potensi backflow yang sebelumnya menyebabkan ketidakseimbangan distribusi pendinginan antara kedua unit cooling tower.

Modifikasi sistem jalur pipa dilakukan pada dua titik utama yang menjadi sumber permasalahan distribusi aliran air pendingin, yaitu pada **titik 1** dan **titik 2**. Kedua titik ini merupakan bagian dari sistem outlet air proses produksi yang terhubung langsung ke unit *cooling tower*. Sebelum dilakukan perubahan, aliran air pada kedua titik tersebut tidak merata, sehingga sebagian air hasil proses tidak mengalami pendinginan secara optimal sebelum masuk kembali ke sistem sirkulasi.



Gambar 6. Penyatuan pipa outlet di titik 1



Gambar 7. Penyatuan pipa di outlet di titik 2

Pada titik 1, dilakukan penyatuan jalur pipa outlet dari dua cooling tower yang sebelumnya bekerja secara terpisah. Penyatuan ini bertujuan untuk menyeimbangkan debit aliran air menuju masing-

masing menara pendingin, sehingga distribusi fluida menjadi lebih seragam dan mengurangi perbedaan tekanan antarjalur.

Sementara itu, pada titik 2, dilakukan penyesuaian jalur pipa dan pemasangan valve control baru untuk mengatur laju aliran air keluar dari area produksi menuju cooling tower. Modifikasi pada titik ini berfungsi untuk mengoptimalkan arah aliran dan memperbaiki sistem sirkulasi agar air yang masuk ke menara pendingin memiliki laju yang stabil.

Secara keseluruhan, modifikasi pada kedua titik tersebut memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi perpindahan panas dan kestabilan sistem pendinginan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu air keluar dari cooling tower menjadi lebih rendah dan fluktuasi suhu selama proses operasi berkurang secara nyata.

3.2 Analisis Hasil Modifikasi

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perubahan kinerja sistem induced draft cooling tower sebelum dan sesudah dilakukan modifikasi pada jalur pipa distribusi air. Pengujian dilakukan pada kondisi suhu air masuk (inlet temperature) sebesar 38 °C, sedangkan suhu air keluar (outlet temperature) diamati untuk masing-masing kondisi—sebelum dan sesudah modifikasi—guna menilai peningkatan efektivitas pendinginan yang terjadi.

Berdasarkan hasil pengujian, suhu air keluar sebelum modifikasi tercatat sebesar 33,78 °C, sedangkan setelah dilakukan modifikasi menurun menjadi 28,95 °C. Penurunan suhu ini menunjukkan bahwa proses perpindahan panas antara air dan udara di dalam cooling tower menjadi lebih optimal setelah dilakukan perubahan pada konfigurasi sistem jalur pipa.

Tabel 2. Data temperatur cooling tower sebelum modifikasi

No	Parameter	Satuan	Sebelum Modifikasi	Sesudah Modifikasi
1	Suhu masuk	°C	38	38
2	Suhu keluar	°C	33.78	28.95
3	Range	°C	5.17	9.20
4	Approach	°C	4.68	2.66
5	Efektifitas	%	52.45	77.58
6	Kapasitas Pendinginan	kW	21717.4	61515.1
7	Head loss mayor	m	9.57	17.04
8	Head loss minor	m	29.54	46.67
9	Reynold number	-	8953	13197

Berdasarkan data pada Tabel 1, diperoleh beberapa parameter penting yang menggambarkan peningkatan performa sistem setelah dilakukan modifikasi, antara lain:

Range meningkat dari 5,17 °C menjadi 9,12 °C. Peningkatan nilai range menunjukkan bahwa selisih antara suhu masuk dan suhu keluar air semakin besar. Hal ini menandakan bahwa kemampuan sistem dalam melepas panas ke udara meningkat secara signifikan, sehingga efektivitas proses pendinginan menjadi lebih tinggi.

Approach menurun dari 4,68 °C menjadi 2,61 °C, yang menunjukkan bahwa suhu air keluar semakin mendekati suhu bola basah udara (wet-bulb temperature). Penurunan nilai approach mengindikasikan bahwa proses pendinginan berlangsung lebih efisien, mendekati kondisi ideal di mana udara hampir mencapai kejenuhan maksimum terhadap panas yang dilepaskan oleh air.

Kapasitas pendinginan mengalami peningkatan yang sangat signifikan, dari 21.717,4 kW menjadi 61.515,1 kW. Hal ini berarti cooling tower hasil modifikasi mampu membuang panas dalam jumlah yang jauh lebih besar, sehingga volume air yang dapat didinginkan meningkat. Kondisi ini secara

langsung mendukung proses produksi atau sistem utilitas yang memerlukan pendinginan berkelanjutan dalam kapasitas tinggi.

Efektivitas sistem pendinginan meningkat dari 52,45 % menjadi 77,58 %, yang menunjukkan bahwa kinerja termal sistem semakin mendekati kondisi ideal. Peningkatan efektivitas ini membuktikan bahwa modifikasi jalur pipa berkontribusi besar terhadap perbaikan distribusi aliran air dan peningkatan kontak antara udara dan air di dalam cooling tower.

Selain peningkatan parameter termal, hasil analisis hidraulik menunjukkan bahwa head loss total juga mengalami peningkatan baik pada kerugian mayor maupun minor dengan total kenaikan dari 39,11 m menjadi 63,71 m. Peningkatan ini menandakan adanya tambahan resistansi aliran akibat perubahan konfigurasi pipa, namun tetap berada dalam batas yang dapat diterima mengingat peningkatan kinerja pendinginan yang signifikan.

Sementara itu, bilangan Reynold (Re) meningkat dari 8.953 menjadi 13.197, yang menunjukkan peningkatan karakteristik aliran dari kondisi mendekati laminar menuju turbulen. Aliran turbulen ini berperan penting dalam memperbaiki proses perpindahan panas antara air dan udara, sehingga mendukung peningkatan efisiensi termal sistem secara keseluruhan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa modifikasi jalur pipa pada sistem induced draft cooling tower berhasil meningkatkan performa pendinginan, baik dari sisi kapasitas, efektivitas, maupun karakteristik aliran fluida. Peningkatan ini menunjukkan bahwa rancangan hasil modifikasi dapat diterapkan sebagai solusi teknis untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin dalam aplikasi industri yang membutuhkan stabilitas dan performa tinggi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini telah melakukan modifikasi pada jalur pipa (line) dan analisis kinerja termal serta hidraulik pada sistem induced draft cooling tower untuk mengevaluasi pengaruh perubahan desain terhadap peningkatan performa pendinginan. Melalui serangkaian perhitungan dan analisis eksperimental, diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

- a. Kapasitas pendinginan mengalami peningkatan yang signifikan setelah dilakukan modifikasi pada sistem jalur pipa. Sebelum modifikasi, kapasitas pendinginan tercatat sebesar 21.717,4 kW, sedangkan setelah modifikasi meningkat menjadi 61.515,1 kW, atau terjadi kenaikan sebesar 39.797,7 kW. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan pada konfigurasi aliran fluida mampu meningkatkan efisiensi perpindahan panas antara air dan udara di dalam menara pendingin.
- b. Efektivitas pendinginan juga menunjukkan peningkatan yang cukup besar, dari 52,45% menjadi 77,58%, dengan kenaikan sebesar 25,13%. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa cooling tower hasil modifikasi mampu menurunkan suhu air dengan lebih efektif, sehingga kinerja sistem secara keseluruhan tergolong baik dan efisien.
- c. Dari sisi kerugian tekanan (head loss total), hasil analisis menunjukkan adanya peningkatan nilai dari 29,54 m sebelum modifikasi menjadi 63,71 m setelah modifikasi. Kondisi ini menandakan adanya tambahan kerugian energi akibat perubahan jalur pipa dan konfigurasi sistem aliran. Namun, peningkatan head loss tersebut masih dapat diterima karena diimbangi oleh peningkatan signifikan pada kapasitas dan efektivitas pendinginan sistem.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini membuktikan bahwa modifikasi jalur pipa pada sistem induced draft cooling tower dapat meningkatkan performa termal dan efektivitas pendinginan secara nyata, meskipun berdampak pada peningkatan kerugian tekanan. Dengan demikian, desain hasil modifikasi dapat dipertimbangkan sebagai alternatif perbaikan untuk meningkatkan efisiensi sistem pendingin pada aplikasi industri.

Daftar Pustaka

- [1] J.C. Hensley, *Cooling Tower Fundamentals*, Overland Park, Kansas, 2009.

- [2] P. Navarro, J. Ruiz, A.S. Kaiser, M. Lucas, Effect of fill length and distribution system on the thermal performance of an inverted cooling tower, *Appl Therm Eng* 231 (2023) 120876. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120876>.
- [3] S.C. Kranc, The Effect of Nonuniform Water Distribution on Cooling Tower Performance, *Journal of Energy* 7 (1983) 636–639. <https://doi.org/10.2514/3.62710>.
- [4] Y. Zhou, Q. Li, Z. Wang, S. Li, F. Wei, J. Liu, D. Yu, Thermal performance model of cooling towers for operational optimization: An equivalent temperature difference coefficient-based approach, *Appl Therm Eng* 252 (2024) 123595. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.123595>.
- [5] Z. Li, H. Wei, T. Wu, X. Du, Optimization for circulating cooling water distribution of indirect dry cooling system in a thermal power plant under crosswind condition with evolution strategies algorithm, *Energies (Basel)* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14041167>.
- [6] Y.A. Çengel, A.J. Ghajar, *Heat and mass transfer : fundamentals & applications*, Fifth Edition, McGraw Hill Education, New York, 2015.
- [7] M.A. Irawan, H. Ahyadi, ANALISIS TEMPERATUR LINGKUNGAN TERHADAP KINERJA COOLING TOWER TIPE INDUCED DRAFT UNIT 2 PADA PT. X, 2020.
- [8] H. Alkindi, H. Santosa, E. Sutoyo, ANALISIS HEAD LOSSES PADA CIRCULATING FLUIDA AIR DALAM DUA JENIS PIPA, 2023.