E-ISSN : 2988-1986
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 1 Tahun 2026

ANALISIS KINERJA DAN OPTIMASI EFISIENSI ENERGI PADA SISTEM PENDINGIN *COOLING TOWER*

Muhammad Syauqi AL Banaa*[1], Muhamad Safi'i[2], Althesa Androva[3]
[1,2,3] Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas PGRI Semarang
E-mail: syauqialbanaa30@gmail.com*[1]

ABSTRACT

Cooling towers play a crucial role in industrial and corporate cooling systems. Given the substantial energy consumed by fans and water circulation systems, periodic performance analysis and energy efficiency improvement efforts are highly demanded. This study aims to analyze the actual operational performance of a cooling tower and assess the potential for energy savings without reducing cooling capacity. In the performance analysis, parameters such as inlet water temperature (T_{in}), outlet water temperature (T_{out}), wet-bulb temperature (T_{wb}), as well as water and air flow rates, will be evaluated to determine the range, approach, and thermal effectiveness. Meanwhile, the energy efficiency analysis will focus on optimizing fan power consumption relative to cooling capacity (kW/TR) and reducing water losses caused by blowdown and evaporation. The results indicate that environmental factors and equipment maintenance significantly influence the operational effectiveness of the cooling tower. Efforts to improve system energy efficiency can be achieved by utilizing Variable Frequency Drives (VFD) to regulate water flow rates and fan speeds, as well as implementing Cycles of Concentration (COC) management to reduce make-up water requirements.

Keywords: *Cooling Tower, Energy Efficiency, Thermal Performance, VFD, Cooling System.*

ABSTRAK

Cooling tower memegang peranan krusial dalam sistem pendingin industri dan perusahaan, mengingat besarnya energi yang dikonsumsi oleh kipas dan sistem sirkulasi air menuntut adanya analisis kinerja berkala serta upaya peningkatan efisiensi energi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja operasional *cooling tower* aktual serta mengkaji potensi penghematan energi tanpa mengurangi kapasitas pendinginan. Dalam analisis kinerja, parameter suhu air masuk (T_{in}), suhu air keluar (T*out*), suhu bola basah (T_{wb}), serta laju aliran air dan udara akan dianalisis untuk menentukan nilai *range*, *approach*, dan efektivitas termal. Sementara itu, analisis efisiensi energi akan difokuskan pada optimalisasi konsumsi daya kipas terhadap kapasitas pendinginan (kW/TR) serta pengurangan kehilangan air akibat *blowdown* dan penguapan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan pemeliharaan peralatan sangat memengaruhi efektivitas

Article History
Received: Juni 2026
Reviewed:Juni 2026
Published: Juni 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

operasional menara pendingin. Upaya peningkatan efisiensi energi sistem dapat dilakukan melalui penggunaan *Variable Frequency Drive* (VFD) untuk mengatur laju aliran air dan kecepatan kipas, serta penerapan manajemen *Cycles of Concentration* (COC) guna mengurangi kebutuhan air pengganti (*make-up water*).

***Kata Kunci**: Cooling Tower, Efisiensi Energi, Performa Termal, VFD, Sistem Pendingin.*

1. PENDAHULUAN

Sistem pendingin merupakan infrastruktur vital yang mendukung kelancaran operasional industri proses, sektor pembangkit listrik, dan gedung komersial berskala besar. Berbagai peralatan dalam proses industry seperti kondensor, kompresor, dan sistem pendingin *jacket* menghasilkan panas buangan yang harus segera dibuang demi menjaga keberlangsungan proses produksi dan meningkatkan efisiensi mesin utama. *cooling tower* menjadi perangkat yang paling umum digunakan untuk pelepasan panas karena efektivitas biayanya serta kemampuannya menangani beban pendinginan yang sangat besar. Prinsip kerja peralatan ini didasarkan pada kontak langsung antara air hangat hasil proses dengan udara atmosfer, yang melibatkan perpindahan panas laten dan sensibel melalui proses penguapan sebagian air tersebut. Terlepas dari fungsinya yang krusial, *cooling tower* merupakan salah satu konsumen listrik dan air terbesar dalam sistem utilitas pabrik. Konsumsi listrik yang tinggi terutama disebabkan oleh kerja motor kipas untuk mengalirkan udara serta pompa untuk menyirkulasikan air di dalam kondensor. Konsumsi listrik ini bersifat dinamis dan sangat bergantung pada fluktuasi kondisi iklim makro, khususnya suhu bola basah (*wet-bulb temperature*) (ASHRAE, 2020). Dalam kondisi cuaca ekstrem atau ketika komponen internal seperti media pengisi (*media fill*) mengalami penurunan kualitas akibat *fouling* dan pertumbuhan alga, efisiensi termal menara akan menurun drastis. Penurunan kinerja ini memaksa motor kipas bekerja lebih lama pada beban penuh demi mencapai kapasitas pendinginan yang dibutuhkan, yang pada akhirnya menyebabkan peningkatan konsumsi listrik spesifik (Maulana, 2025).

Selain masalah energi, pemborosan air juga merupakan salah satu tantangan terbesar dalam pengoperasian sistem *cooling tower*. Proses penguapan yang terus-menerus menyebabkan peningkatan konsentrasi padatan terlarut dalam air yang bersirkulasi, sehingga diperlukan pembuangan sebagian air *blowdown* untuk mencegah terbentuknya kerak dan korosi pada pipa. Jika pengelolaan siklus konsentrasi (*cycles of concentration* atau COC) tidak dilakukan dengan baik, akan terjadi pemborosan air dan peningkatan kebutuhan air pengganti *make-up water*, yang pada akhirnya meningkatkan biaya operasional serta menimbulkan

dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, evaluasi kinerja termal dan optimalisasi efisiensi energi harus dilakukan secara berkala. Berbagai parameter kinerja actual seperti *range*, *approach*, dan efektivitas termal perlu diukur secara akurat untuk mengidentifikasi potensi pemborosan energi. Salah satu solusi teknologi yang efektif untuk meminimalkan konsumsi listrik spesifik adalah penerapan *Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor kipas; teknologi ini memungkinkan penyesuaian kecepatan kipas secara otomatis berdasarkan beban panas aktual dan suhu lingkungan (Said & Al-Zahahrani, 2018). Melalui metode audit energi dan optimalisasi ini, diharapkan konsumsi listrik per ton refrigerasi (kW/TR) serta kehilangan air dapat diminimalkan tanpa mengurangi kapasitas pendinginan sistem.

2. METODE PENELITIAN

Penilaian metode analisis kinerja dan efisiensi optimal energi di *cooling tower* dengan mempertimbangkan tingkat *heat transfer rate*, *mass flow rate* dan *thermal efficiency* dengan menggunakan beberapa parameter kunci seperti *range*, *approach* dan *wet bulb temperature*. Tahap awal proses ini dimulai dengan pemilihan data operasional nyata yang mencakup pengamatan nilai suhu air panas *inlet* (T_{in}), suhu air dingin *outlet* (T_{out}), suhu udara *wet bulb ambient* (T_{wb}), juga *mass flow rate air* dan udara (Ramadhan, 2022)..

Gambar 1. Unit Menara Pendingin (*Cooling Tower*) Tipe Industri Eksisting Pabrik
Sumber: Produk industri rakshan *cooling towers*

Selanjutnya, data tersebut digunakan untuk melakukan **perhitungan parameter kinerja termal,** di mana nilai *Range* (R) ditentukan dari selisih suhu air masuk dan keluar:

$$R = T_{in} - T_{out} \quad \text{.....(1)}$$

Nilai *Approach* (A) dihitung dari selisih suhu air keluar dan suhu bola basah (Azis & Hermawan, 2020):

$$A = T_{out} - T_{wb} \quad \text{.....(2)}$$

Serta efektivitas menara (E) dievaluasi melalui rasio rentang aktual terhadap rentang teoritis maksimal (Prasetyo & Setiawan, 2021):

$$E = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{wb}} \times 100\% \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

Selanjutnya melakukan analisis neraca massa dan energi berdasarkan Hukum Kekekalan Massa dan Energi guna menghitung transfer panas dari air ke udara, sekaligus menghitung beberapa kerugian air (*losses*) karena *evaporation*, *drift*, dan *blowdown* (Harahap, 2019).

Step terakhir yang dilakukan adalah mengeksekusi strategi optimasi efisiensi energi berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan sebelumnya, yang di antaranya meliputi optimasi *speed* kipas dengan *Variable Frequency Drive* (VFD) sehingga rpm motor sinkron dengan beban pembekuan, manajemen air quality dengan membersihkan fill media pendingin secara periodik dan mengontrol COC dalam sistem water treatment untuk menghindari *scale* dan optimasi *flow rate air* supaya debit air masuk dapat menghasilkan temperatur keluaran yang ideal bagi *machine support system* seperti *chiller*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Kinerja Termal Aktual Menara Pendingin

Melalui pencatatan data operasional secara real time, parameter temperatur yang tercatat adalah temperatur air panas masuk (T_{in}) dengan temperatur 37,5 ˚C, temperatur air dingin keluar (T_{out}) dengan temperatur 32,0 ˚C, serta temperatur bola basah lingkungan (T_{wb}) dengan temperatur 26,5 ˚C. Dengan demikian, melalui penggantian nilai-nilai tersebut ke dalam Persamaan (1), (2), dan (3) pada table 1:

Tabel 1. Ringkasan Parameter Kinerja Termal Aktual

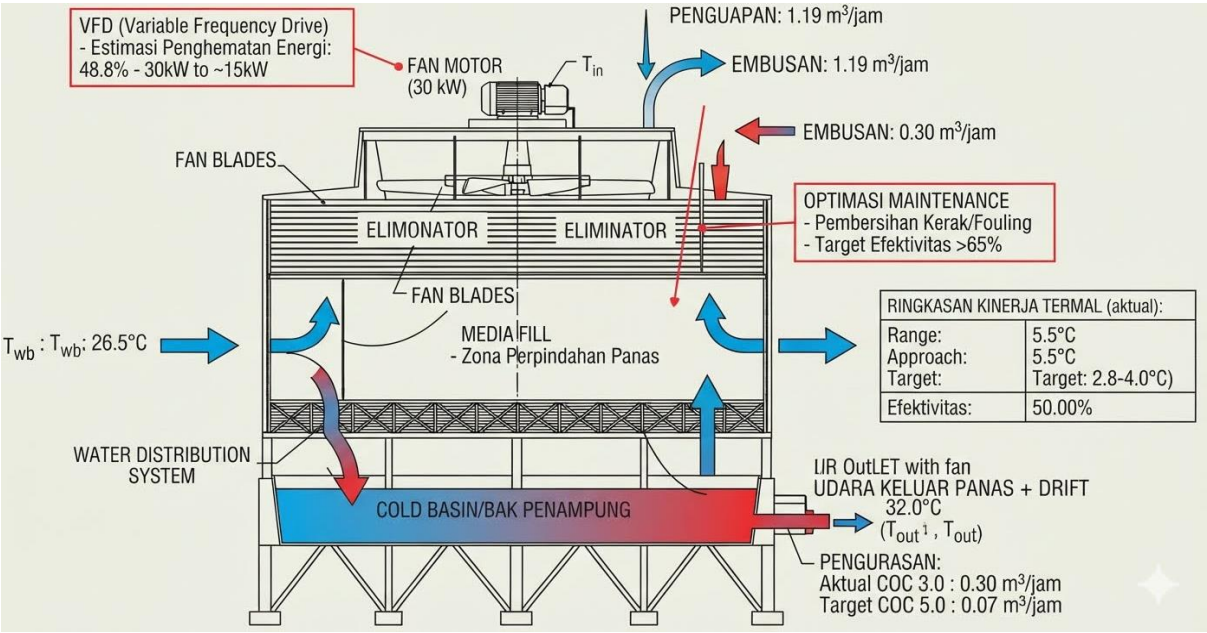
Parameter Operasional	Nilai Eksisting	Standar Ideal Industri
Temperatur Air Panas Masuk (T_{in})	37,5 ˚C	
Temperatur Air Dingin Keluar (T_{out})	32,0 ˚C	
Temperatur Bola Basah (T_{wb})	26,5 ˚C	
Range (R)	5,5 ˚C	6,0 ˚C – 8,0 ˚C
Approach (A)	5,5 ˚C	2,8 ˚C – 4,0 ˚C
Efektivitas Termal (E)	50,00 %	> 65,00 %

Berdasarkan Tabel 1, nilai *range* yang dihasilkan adalah sebesar 5,5 ˚C. Nilai ini menunjukkan selisih suhu air yang berhasil diturunkan oleh menara pendingin untuk membuang beban kalor dari sistem chiller/kondensor ke atmosfer. Capaian ini masih berada di bawah target desain optimal industri. Sementara itu, nilai *approach* tercatat sebesar 5,5 ˚C,

parameter *approach* merupakan indikator utama kedekatan performa menara terhadap batas teoritis pendinginan maksimum (suhu *wet bulb*). Jarak operasional sebesar 5,5 °C menandakan adanya penurunan (degradasi) kemampuan perpindahan kalor. Akibatnya, nilai efektivitas termal aktual menara pendingin hanya mencapai 50,00%, yang mengindikasikan bahwa unit saat ini beroperasi dalam kategori kurang optimal.

2. Analisis Kesetimbangan Massa dan Kehilangan Air (*Water Losses*)

Untuk meninjau distribusi massa cairan di dalam sistem, dilakukan perhitungan neraca air berbasis laju alir sirkulasi aktual perusahaan sebesar $\dot{m}_w = 150\ m^3/jam$. Kerugian air terbagi ke dalam tiga fraksi utama, yaitu penguapan (*evaporation*), hembusan angin (*drift*), dan pengurasan (*blowdown*).



Gambar 2. Skema Neraca Massa, Kinerja Termal, dan Titik Optimasi Energi *Cooling Tower*

Sistem pendingin mengalami total kehilangan air melalui tiga mekanisme utama, yaitu *evaporation loss* (E_{loss}) sebesar 1,19 m³/jam akibat proses alami pelepasan kalor laten air ke udara, *drift loss* (D_{loss}) sebesar 0,30 m³/jam berupa titik air yang ikut terbang karena berkurangnya kerapatan komponen *drift eliminator*, serta *blowdown loss* (B_{loss}) sebesar 0,30 m³/jam yang dibuang secara periodik pada nilai *Cycles of Concentration* (COC) 3,0 untuk membatasi konsentrasi padatan terlarut agar tidak memicu kerak.

3. Evaluasi Implementasi Strategi Optimasi Energi

3.1 Pemasangan *variable frequency drive* (VFD) pada motor kipas

Sebelum dilakukan optimasi, motor kipas (P_1) berdaya 30 kW beroperasi secara konstan pada kondisi motor listrik beroperasi menggunakan frekuensi listrik standar maksimum

(N_1) sebesar 50 Hz. Pola operasi konstan ini memicu pemborosan energi yang tinggi saat terjadi penurunan beban pendinginan pabrik atau saat temperatur udara lingkungan (T_{wb}) sedang rendah (misalnya pada malam hari atau musim hujan).

Dengan mengintegrasikan *Variable Frequency Drive* (VFD) yang dikendalikan oleh sensor suhu otomatis berbasis fluktuasi temperatur (T_{out}), frekuensi kerja motor dapat diturunkan secara dinamis (N_2) hingga 40 Hz (ekuivalen dengan 80% dari kecepatan putar nominal). Berdasarkan Hukum Afinitas Kipas (*Fan Affinity Laws*), hubungan kebutuhan daya berbanding lurus dengan pangkat tiga kecepatan putarnya:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3 \text{.....(4)}$$

$$P_2 = 30\ kW \times (0{,}8)^3 = 15{,}36\ kW$$

Melalui optimasi ini, konsumsi daya motor kipas dapat ditekan dari 30 kW menjadi 15,36 kW. Strategi ini berhasil memberikan potensi penghematan energi listrik sebesar 48,80% selama periode beban parsial (*low-load period*).

3.2 Manajemen kualitas air dan pengendalian nilai COC

Rendahnya efektivitas termal menara (50,00%) pada kondisi eksisting terindikasi kuat akibat adanya akumulasi *bio-fouling* serta endapan kerak tipis pada celah media *fill*. Hambatan material ini membatasi kontak intim antara lapisan air dan udara. Dengan begitu, sebagai upaya untuk memperbaiki proses produksi tersebut, dianjurkan adanya agenda pembersihan kimia (*chemical cleaning*) yang teratur dengan tujuan membersihkan media *fill* dan meningkatkan target COC yang semula 3,0 hingga 5,0. Hasil simulasi manajemen air juga menunjukkan bahwa peningkatan nilai COC ini dapat secara efektif memangkas laju blowdown dari 0,30 m^3/jam hingga 0,07 m^3/jam. Hal ini tentunya memiliki manfaat ganda, yakni menghemat.

3.3 Efek sinkronisasi laju aliran air terhadap efisiensi *chiller*

Pengaturan ulang laju aliran air (*water flow rate*) agar merata di atas *media fill* dan stabil pada target 32,0 °C terbukti mampu meringankan beban kompresor *chiller* sebesar 0,5% hingga 1%, yang secara langsung menurunkan indeks konsumsi daya total (kW/TR) perusahaan. Optimasi energi ini disempurnakan oleh implementasi *Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor kipas yang memotong konsumsi daya listrik hingga 48,80% saat beban parsial, serta perbaikan manajemen kualitas air melalui *chemical cleaning* dan peningkatan nilai *Cycles of Concentration* (COC) dari 3,0 ke 5,0. Kombinasi strategi tata kelola tersebut berhasil memangkas volume pengurasan (*blowdown*) secara drastis dari 0,30 m^3/jam menjadi 0,07 m^3/jam, sehingga integrasi seluruh sistem ini sukses menurunkan biaya operasional makro listrik dan air sekaligus menjaga performa keberlanjutan sistem tata udara industri.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis, evaluasi unjuk kerja, dan optimasi efisiensi energi pada sistem *cooling tower*, dapat disimpulkan bahwa performa termal eksisting unit saat ini beroperasi kurang optimal dengan efektivitas termal hanya 50,00% (nilai *range* 5,5 °C dan *approach* 5,5 °C) akibat fluktuasi suhu bola basah (*wet-bulb temperature*) serta degradasi perpindahan kalor yang dipicu oleh akumulasi *bio-fouling* dan kerak pada *media fill*. Evaluasi neraca air menunjukkan bahwa total kehilangan air mencakup kehilangan akibat penguapan sebesar 1,19 m^3/jam, kehilangan akibat *drift* sebesar 0,30 m^3/jam, dan kehilangan akibat *blowdown* sebesar 0,30 m^3/jam pada nilai *Cycles of Concentration* (COC) 3,0. Namun, penerapan strategi optimalisasi melalui pemasangan *Variable Frequency Drive* (VFD) pada motor kipas berhasil menurunkan frekuensi operasi dari 50 Hz menjadi 40 Hz; berdasarkan Hukum Afinitas Kipas (*Fan Affinity Law*), langkah ini secara otomatis memangkas konsumsi daya dari 30 kW menjadi 15,36 kW atau menghemat konsumsi daya listrik spesifik (kW/TR) sebesar 48,80% pada kondisi beban parsial tanpa mengurangi kapasitas pendinginan. Selain itu, peningkatan manajemen kualitas air melalui pembersihan kimiawi secara berkala dan kenaikan target nilai COC dari 3,0 menjadi 5,0 berhasil memangkas laju *blowdown* secara drastis hingga menjadi 0,07 m^3/jam, di mana integrasi seluruh langkah tersebut termasuk sinkronisasi laju aliran mampu meringankan beban kompresor *chiller* sebesar 0,5% hingga 1,0%.. Dengan demikian, kombinasi integratif antara teknologi VFD, pembersihan komponen, dan tata kelola air yang sistematis ini terbukti sangat efektif menurunkan biaya operasional makro listrik dan air, meminimalkan kebutuhan *make-up water*, menjaga keandalan mesin industri penunjang, serta mendukung keberlanjutan proses produksi yang ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2020). ASHRAE handbook—HVAC systems and equipment. ASHRAE.

Fauzi, D. A., & Rudiyanto, B. (2016). Analisa performa menara pendingin pada PT Geo Dipa Energi Unit Dieng. Jurnal Desiminasi Teknologi, 4(1), 23–31.

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2015). Pedoman teknis efisiensi energi untuk sistem penyediaan energi: Menara pendingin (cooling tower). Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan, dan Konservasi Energi.

Maulana, I. (2025). Analisis kinerja cooling tower induced draft counter flow di texturizing plant PT. X [Skripsi sarjana, Universitas Nasional]. Repositori Universitas Nasional.

Perry, R. H., & Green, D. W. (2019). Perry's chemical engineers' handbook (9th ed.). McGraw-Hill Education.

Putri, A. M., Asri, R., & Yunesti, P. (2026). Studi pengaruh metode pengendalian motor terhadap konsumsi energi pada sistem cooling tower. Jurnal Infotekmesin, 17(1), 45–52. doi.org

Said, S. A., & Al-Zahahrani, A. (2018). Performance evaluation and energy optimization of industrial cooling towers using variable speed drives. Energy Conversion and Management, 165, 412–423. doi.org

SPX Cooling Technologies. (2016). Cooling tower performance: Fundamentals and applications. SPX Cooling Technologies.

Azis, A., & Hermawan, T. (2020). Analisa kinerja cooling tower tipe counter flow induced draft untuk menentukan efektivitas termal. Academia.edu. academia.edu

Harahap, R. A. (2019). Laporan magang: Analisis efisiensi dan evaluasi kinerja cooling tower di area Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) [Laporan Magang, PT Indonesia Power]. Scribd. scribd.com

Prasetyo, B., & Setiawan, I. (2021). Analisis performa cooling tower jenis induced draft counter flow di power plant PT X. ResearchGate. researchgate.net

Ramadhan, F. (2022). Evaluasi karakteristik termal range, approach, dan efektivitas menara pendingin (cooling tower) [Skripsi, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa]. Repository UNTIRTA. untirta.ac.id

Suryawan, A., & Wijaya, K. (2023). Optimasi kinerja cooling tower induced draft crossflow untuk efisiensi konsumsi energi listrik kipas. Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, 5(1), 112-120. pnj.ac.id.