



Sistem Manajemen Termal Cerdas untuk Pusat Data AI: Optimalisasi Pendinginan Cair dan Pemanfaatan Energi Sisa

Tiara Amanda^{1*}, Umar Syarif Hidayat²

¹⁻² Universitas Bina Nusantara, Indonesia

Alamat: Jl. Kebon Jeruk Raya No. 27, Kebon Jeruk, Jakarta Barat

Email Tiaraamanda@binus.ac.id^{1}, Umarsyarifhidayat@binus.ac.id²

Korespondensi penulis: Tiaraamanda@binus.ac.id

Abstract. *The exponential growth of artificial intelligence (AI) computing has driven a significant increase in the energy intensity of data centers, with rack power consumption potentially exceeding 100 kW and chip heat loads reaching thousands of watts. These conditions render conventional air-based cooling systems inadequate, thereby driving the transition toward more efficient liquid cooling technologies. This study addresses the development of an intelligent thermal management system for AI data centers that integrates liquid cooling optimization with waste heat utilization. Direct-to-chip liquid cooling has been proven to improve system stability by up to 40% and reduce energy consumption by up to 60% compared to air cooling. Furthermore, this system enables the recovery of waste heat at temperatures around 45–55°C with utilization rates reaching up to 98% for applications such as district heating, greenhouses, or hot water production. The study also explores the integration of artificial intelligence for predictive thermal control and grade-matched cooling-based waste heat utilization to optimize overall energy efficiency. The analysis results indicate that intelligent liquid cooling-based thermal management systems not only address the cooling challenges of high-density AI data centers but also contribute to the decarbonization of digital infrastructure through reduced operational emissions and more sustainable energy utilization.*

Keywords: *liquid cooling, AI data center, intelligent thermal management, waste heat utilization, energy efficiency, direct-to-chip cooling*

Abstrak. Pertumbuhan komputasi kecerdasan buatan (AI) yang eksponensial telah mendorong peningkatan signifikan pada intensitas energi pusat data, dengan konsumsi daya rak yang dapat melampaui 100 kW dan beban panas chip yang mencapai ribuan watt. Kondisi ini membuat sistem pendingin berbasis udara konvensional tidak lagi memadai, sehingga mendorong transisi menuju teknologi pendinginan cair yang lebih efisien. Penelitian ini membahas pengembangan sistem manajemen termal cerdas untuk pusat data AI yang mengintegrasikan optimalisasi pendinginan cair dengan pemanfaatan energi sisa. Pendinginan cair langsung ke chip (direct-to-chip liquid cooling) terbukti mampu meningkatkan stabilitas sistem hingga 40% dan mengurangi konsumsi energi hingga 60% dibandingkan pendinginan udara. Selain itu, sistem ini memungkinkan pemulihan panas buangan bersuhu sekitar 45–55°C dengan tingkat pemanfaatan hingga 98% untuk aplikasi seperti pemanas distrik, rumah kaca, atau produksi air panas. Studi juga mengeksplorasi integrasi kecerdasan buatan untuk kontrol termal prediktif dan pemanfaatan energi sisa berbasis kesesuaian grade (grade-matched cooling) guna mengoptimalkan efisiensi energi secara keseluruhan. Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem manajemen termal cerdas berbasis pendinginan cair tidak hanya mengatasi tantangan pendinginan pusat data AI berdensitas tinggi, tetapi juga berkontribusi pada dekarbonisasi infrastruktur digital melalui pengurangan emisi operasional dan pemanfaatan energi yang lebih berkelanjutan.

Kata Kunci: pendinginan cair, pusat data AI, manajemen termal cerdas, pemanfaatan energi sisa, efisiensi energi, pendinginan langsung ke chip

1. LATAR BELAKANG

Perkembangan kecerdasan buatan (AI) yang pesat dalam beberapa tahun terakhir telah mendorong transformasi besar-besaran pada infrastruktur pusat data. Hadirnya model-model bahasa besar seperti ChatGPT pada tahun 2023 dan DeepSeek menandai lonjakan signifikan dalam kebutuhan komputasi yang berdampak langsung pada intensitas energi pusat data

generasi berikutnya . Jika pada era internet awal (sekitar tahun 2000) intensitas energi pusat data masih berada di kisaran 650 W/m^2 , dan pada periode 2010–2016 meningkat hingga sekitar 5000 W/m^2 , maka pusat data AI generasi terkini dapat mencapai intensitas energi hingga sekitar 20.000 W/m^2 30 kali lebih tinggi dari pusat data legacy dan sekitar 200 kali lebih tinggi dari bangunan residensial .

Peningkatan drastis ini terutama disebabkan oleh penggunaan *Graphics Processing Unit* (GPU) yang menjadi tulang punggung komputasi AI. GPU dirancang untuk pemrosesan paralel yang memungkinkan pemrosesan kumpulan data besar secara simultan, namun konsekuensinya adalah konsumsi daya yang jauh lebih besar dibandingkan prosesor konvensional . Sebuah rak yang berisi server GPU dapat dengan mudah menuntut daya 30 kW, 50 kW, atau bahkan melampaui 100 kW, jauh di atas server enterprise tipikal yang hanya membutuhkan 5–10 kW . Bahkan, tingkat kepadatan rak di pusat data enterprise telah meningkat hingga 100 kW per rak .

Beban panas yang dihasilkan oleh kepadatan daya ini menjadi tantangan serius bagi sistem manajemen termal konvensional. Pendinginan berbasis udara (*air cooling*), yang selama puluhan tahun menjadi andalan industri, mulai menunjukkan keterbatasannya dalam menangani fluks panas yang semakin tinggi . Sistem pendingin udara menghadapi kendala efisiensi perpindahan panas, keterbatasan aliran udara di tengah kepadatan peralatan yang semakin tinggi, serta konsumsi energi yang membengkak . Dengan pendinginan menyumbang sekitar 30–40% dari total konsumsi energi pusat data , inefisiensi sistem pendingin berdampak langsung pada biaya operasional dan jejak karbon.

Dalam konteks ini, pendinginan cair (*liquid cooling*) muncul sebagai solusi yang semakin relevan dan bahkan tidak terelakkan . Berbeda dengan udara, cairan memiliki kapasitas termal dan kinerja perpindahan panas yang jauh lebih tinggi, sehingga mampu membuang panas secara lebih efektif langsung dari sumbernya . Teknologi pendinginan cair langsung ke chip (*direct-to-chip liquid cooling*) memungkinkan pendinginan GPU dan CPU dengan menggunakan cold plate yang ditempelkan langsung pada kemasan prosesor, dengan fluida pendingin bersirkulasi melalui saluran mikro untuk menyerap panas secara efisien .

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem berpendingin cair dapat memberikan peningkatan kinerja komputasi hingga 17% sekaligus mengurangi konsumsi daya di tingkat simpul hingga 16% dibandingkan sistem berpendingin udara . Pada skala fasilitas besar dengan 2.000 hingga 5.000 simpul GPU, potensi penghematan biaya energi tahunan mencapai \$2,25–11,8 juta . Suhu GPU pada sistem berpendingin cair dapat dijaga pada kisaran $46\text{--}54^\circ\text{C}$, jauh lebih rendah dibandingkan pendingin udara yang mencapai $55\text{--}71^\circ\text{C}$. Selain itu,

pendinginan cair memungkinkan peningkatan kepadatan rak, kontrol suhu yang lebih ketat, dan pengurangan konsumsi energi pendinginan secara keseluruhan .

Keunggulan lain dari pendinginan cair yang semakin mendapat perhatian adalah potensi pemanfaatan energi sisa (*waste heat recovery*). Pusat data GPU, dengan kepadatan panasnya yang lebih tinggi, seringkali memerlukan solusi pendinginan cair yang memungkinkan penangkapan energi termal dengan kualitas lebih tinggi untuk digunakan kembali . Panas buangan yang ditangkap, yang dapat mencapai suhu sekitar 50°C, dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi seperti pemanas distrik (*district heating*), produksi air panas, pemanasan rumah kaca, atau bahkan pembangkit listrik . Tingkat pemanfaatan panas dapat mencapai 98% , menjadikan pusat data AI tidak hanya sebagai konsumen energi, tetapi juga sebagai prosumer produsen sekaligus konsumen energi dalam sistem energi cerdas . Integrasi ini sejalan dengan upaya dekarbonisasi infrastruktur digital dan mendukung target pembangunan berkelanjutan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem manajemen termal cerdas untuk pusat data AI yang mengintegrasikan optimalisasi pendinginan cair dengan pemanfaatan energi sisa secara holistik, guna menjawab tantangan efisiensi energi dan keberlanjutan di era komputasi AI.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Konsep Manajemen Termal Pusat Data

Manajemen termal adalah proses mengatur suhu perangkat keras di pusat data agar tetap dalam batas operasional yang aman. Tujuannya adalah mencegah overheating yang dapat menurunkan kinerja, memperpendek umur komponen, atau bahkan menyebabkan kerusakan sistem. Secara teoritis, manajemen termal melibatkan tiga aspek utama: pembuangan panas (*heat removal*), distribusi suhu (*temperature distribution*), dan efisiensi energi (*energy efficiency*). Semakin tinggi kepadatan komputasi, semakin kompleks manajemen termal yang dibutuhkan.

2.2 Pendinginan Cair (*Liquid Cooling*)

a. Prinsip Dasar

Pendinginan cair bekerja berdasarkan hukum perpindahan panas konveksi. Cairan memiliki kapasitas panas spesifik dan konduktivitas termal yang jauh lebih tinggi daripada udara. Secara sederhana, air mampu menyerap dan membawa panas sekitar 4 kali lebih efektif daripada udara dengan volume yang sama.

Tabel 1 Jenis-Jenis Pendinginan Cair

Jenis	Penjelasan
Direct-to-Chip (DTC)	Cairan dialirkan melalui pelat dingin (cold plate) yang ditempel langsung di atas GPU/CPU. Panas berpindah dari chip ke pelat, lalu dibawa oleh cairan.
Immersion Cooling	Seluruh server direndam dalam cairan dielektrik (tidak konduktif). Panas langsung terserap oleh cairan di sekitar komponen.
Rear-Door Heat Exchanger	Penukar panas dipasang di belakang rak server. Udara panas dari server didinginkan oleh cairan sebelum keluar dari rak.

b. Keunggulan Teoritis Pendinginan Cair

- 1) Efisiensi termal lebih tinggi karena jarak perpindahan panas lebih pendek
- 2) Konsumsi energi lebih rendah karena pompa cairan lebih efisien dibandingkan kipas berkecepatan tinggi
- 3) Kepadatan komputasi lebih tinggi dapat dicapai tanpa khawatir overheating
- 4) Suhu operasi lebih stabil, mengurangi risiko throttling (penurunan kinerja akibat panas)

2.3 Energi Sisa (*Waste Heat*) dan Pemanfaatannya

Apa itu Energi Sisa?

Energi sisa adalah panas yang dihasilkan sebagai produk sampingan dari proses komputasi. Dalam pusat data, hampir seluruh energi listrik yang masuk akhirnya berubah menjadi panas. Secara teoritis, panas ini adalah bentuk energi berkualitas rendah (low-grade heat) karena suhunya relatif rendah (sekitar 45–60°C).

Tingkatan Kualitas Panas (*Grade-Matched Utilization*)

- a. Low-grade heat (30–50°C): cocok untuk pemanas ruangan, air hangat, rumah kaca
- b. Medium-grade heat (50–80°C): cocok untuk pemanas distrik, pengeringan
- c. High-grade heat (>80°C): cocok untuk pembangkit listrik atau proses industri

3. METODE PENELITIAN

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan coupled numerical framework yang mengintegrasikan tiga tingkatan analisis: (1) analisis termal berbasis CFD (Computational Fluid Dynamics) pada tingkat komponen, (2) analisis kinerja energi pada tingkat sistem pendingin, dan (3) evaluasi pemanfaatan energi sisa pada tingkat bangunan .

3.2 Tahapan Penelitian

Tahap 1: Studi Literatur dan Identifikasi Parameter

- a. Melakukan kajian literatur tentang teknologi pendinginan cair (direct-to-chip liquid cooling), sistem manajemen termal cerdas, dan metode pemanfaatan energi sisa
- b. Mengidentifikasi parameter kritis yang mempengaruhi kinerja pendinginan, meliputi suhu suplai cairan pendingin, laju aliran, dan karakteristik beban panas chip
- c. Menentukan spesifikasi sistem target (misalnya, server dengan GPU dan CPU seperti NVIDIA GB200 Grace Blackwell Superchip dengan TDP GPU 1.200 W dan CPU 300 W)

Tahap 2: Pengumpulan Data dan Karakterisasi Sistem

- a. Melakukan eksperimen karakterisasi pada sistem pendinginan untuk memperoleh data parameter operasional seperti laju aliran air, laju aliran udara, dan efektivitas koil pendingin
- b. Mengumpulkan data beban kerja IT dan konsumsi daya dari pusat data yang menjadi objek penelitian
- c. Mengukur suhu operasional chip, suhu cairan pendingin pada titik inlet dan outlet, serta tekanan sistem.

Tabel 2 Instrumen dan Alat Penelitian

Jenis	Alat/Perangkat	Fungsi
Perangkat Keras	Server liquid-cooled dengan cold plate, sensor suhu (termokopel), flow meter, pompa sirkulasi	Pengujian eksperimental dan pengukuran parameter
Perangkat Lunak	CFD software (Cadence Celsius EC Solver, COMSOL), Python (TensorFlow, PyTorch), Gymnasium (untuk RL)	Simulasi numerik, pemodelan ML, dan optimasi kontrol
Sistem Monitoring	Platform IoT dengan sensor real-time, Modbus protocol, Grafana	Pemantauan dan pengumpulan data operasional

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian

Berdasarkan kajian literatur dan analisis data dari berbagai sumber, penelitian ini menghasilkan temuan-temuan utama sebagai berikut:

4.1.1 Kinerja Pendinginan Cair terhadap Stabilitas Termal

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem pendinginan cair langsung ke chip (*direct-to-chip liquid cooling*) mampu menurunkan suhu prosesor secara signifikan. Pada kondisi beban penuh, suhu CPU turun dari 93°C (dengan pendinginan udara) menjadi 56°C (dengan pendinginan cair hibrida) pada suhu inlet 25°C. Penurunan suhu ini sangat krusial karena menjaga chip tetap dalam batas operasional aman, mencegah thermal throttling yang dapat menurunkan kinerja komputasi hingga 30%.

Sistem pendinginan dua fase yang diuji oleh Advanced Cooling Technologies (ACT) bahkan mampu membuang panas hingga 7,5 kW per cold plate dengan fluks panas melebihi 300 W/cm², sambil mempertahankan suhu permukaan di bawah 70°C pada suhu inlet coolant 50°C. Kapasitas ini setara dengan kebutuhan pendinginan untuk "superchip" AI generasi terbaru seperti NVIDIA GB200 yang memiliki TDP (Thermal Design Power) GPU sebesar 1.200 W per chip.

4.1.2 Efisiensi Energi Sistem Pendinginan

Dari sisi konsumsi energi, sistem pendinginan cair terbukti jauh lebih efisien dibandingkan pendinginan udara. Hasil uji coba di University of Chicago menunjukkan penghematan energi hingga 37% pada sistem berpendingin cair tanpa air (*waterless liquid cooling*) dibandingkan sistem dengan rear door heat exchanger (RDHx) konvensional. Penghematan ini terutama berasal dari pengurangan kebutuhan kipas server berkecepatan tinggi yang sebelumnya menyumbang beban listrik signifikan.

Pada skala yang lebih besar, *Cooling Distribution Units* (CDU) modern dilaporkan mengonsumsi listrik 20-30% lebih sedikit dibandingkan unit pendingin udara untuk kapasitas pendinginan yang setara. Dengan kontrol berbasis AI, pemanfaatan aliran pendingin cair dapat ditingkatkan hingga 50%, memberikan penghematan energi tambahan hingga 10% pada sistem pendingin cair.

4.1.3 Pemanfaatan Energi Sisa

Hasil analisis menunjukkan bahwa panas buangan dari sistem pendinginan cair memiliki potensi pemanfaatan yang tinggi. Pada sistem pendinginan cair fase tunggal, suhu air balik (*return temperature*) berkisar antara 45–55°C. Pada suhu ini, panas dapat dimanfaatkan untuk berbagai aplikasi:

- a. Pendinginan serapan (*absorption cooling*): Penelitian menunjukkan bahwa sistem triple-stage absorption chiller berbasis LiBr-H₂O dapat menghasilkan air dingin 50 kW pada suhu 18°C dengan sumber panas 50°C. Di Guangzhou, China, sistem ini

berhasil mengurangi beban pendinginan mekanis hingga 80,5% dengan penghematan listrik tahunan 78,0 MWh .

- b. Pemanas distrik dan air panas: Pada kondisi optimal, tingkat pemanfaatan panas dapat mencapai 98% .
- c. Sistem pompa panas serapan: Sistem serapan dapat dioptimalkan untuk operasi sepanjang tahun dengan *General Coefficient of Performance* (GCOP) mencapai 10,34 pada kondisi ekstrem .

4.1.4 Sistem Manajemen Cerdas Berbasis AI

Penggunaan kecerdasan buatan dalam sistem manajemen termal menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan. Platform KSManage dari KAYTUS berhasil meningkatkan akurasi lokalisasi kesalahan hingga 92% dan meningkatkan pemanfaatan aliran pendingin cair sebesar 50% . Sistem ini mampu:

- a. Memantau parameter real-time (laju aliran, suhu, tekanan) dan menyesuaikan secara dinamis berdasarkan beban kerja
- b. Memprediksi potensi kegagalan sistem pendingin melalui algoritma AI
- c. Merespons kebocoran cairan dalam hitungan milidetik dengan koordinasi otomatis ke CDU
- d. Mengurangi PUE (*Power Usage Effectiveness*) hingga di bawah 1,3

4.2 Pembahasan

4.2.1 Mengapa Pendinginan Cair Menjadi Keharusan untuk Pusat Data AI?

Kepadatan daya pusat data AI telah melampaui batas kemampuan pendinginan udara konvensional. Dengan GPU AI generasi terbaru memiliki TDP di atas 1.000 W dan rak server dapat menuntut daya 60 kW hingga 100 kW per rak , pendinginan udara tidak lagi memadai secara teknis maupun ekonomis .

Pendinginan cair mengatasi keterbatasan ini melalui dua mekanisme utama:

- a. Kapasitas termal yang lebih tinggi: Cairan memiliki kapasitas panas spesifik dan konduktivitas termal jauh lebih tinggi daripada udara, sehingga mampu membawa lebih banyak panas dengan volume dan laju aliran yang lebih kecil.
- b. Jarak perpindahan panas yang lebih pendek: Cold plate ditempelkan langsung pada chip, menghilangkan hambatan termal yang terjadi pada sistem pendinginan udara dengan heatsink dan aliran udara.
- c. Temuan bahwa pendinginan cair dapat menurunkan suhu chip dari 93°C menjadi 56°C menunjukkan efektivitasnya dalam menjaga stabilitas termal. Penurunan suhu ini tidak hanya mencegah throttling tetapi juga memperpanjang umur komponen.

4.2.2 Kontribusi Sistem Cerdas terhadap Efisiensi

Sistem manajemen cerdas berbasis AI memberikan nilai tambah di luar sekadar pendinginan pasif. Dengan kemampuan prediktif dan adaptif, sistem ini dapat:

- a. Mengantisipasi lonjakan beban: Algoritma machine learning memprediksi kebutuhan pendinginan berdasarkan pola beban kerja historis, sehingga pendinginan dapat disiapkan sebelum panas meningkat .
- b. Mengoptimalkan alokasi sumber daya: Sistem secara dinamis menyesuaikan laju aliran cairan pendingin berdasarkan kebutuhan aktual, menghindari pemborosan energi saat beban rendah .
- c. Mendeteksi anomali dini: Pemantauan real-time terhadap parameter seperti tekanan, suhu, dan laju aliran memungkinkan deteksi kebocoran atau kegagalan komponen sebelum menyebabkan downtime .
- d. Peningkatan pemanfaatan aliran pendingin sebesar 50% menunjukkan bahwa optimalisasi berbasis AI tidak hanya mengurangi konsumsi energi tetapi juga memaksimalkan penggunaan infrastruktur yang ada.

4.2.3 Sinergi Pendinginan Cair dan Pemanfaatan Energi Sisa

Salah satu temuan paling menarik adalah potensi pemanfaatan energi sisa yang sebelumnya terbuang. Sistem pendinginan cair menghasilkan panas pada suhu yang cukup tinggi (45–55°C) untuk berbagai aplikasi . Ini menciptakan sinergi di mana pusat data tidak lagi hanya menjadi konsumen energi, tetapi juga prosumer produsen sekaligus konsumen energi.

Aplikasi pendinginan serapan (absorption chilling) yang memanfaatkan panas 50°C untuk menghasilkan air dingin 18°C membuka peluang untuk siklus pendinginan mandiri di dalam pusat data itu sendiri. Di iklim tropis dan subtropis seperti Indonesia, di mana free cooling (pendinginan gratis dari udara luar) kurang efektif, pendekatan ini sangat relevan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan mengenai Sistem Manajemen Termal Cerdas untuk Pusat Data AI, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- a. Pertama, pendinginan cair terbukti menjadi solusi yang sangat efektif untuk mengatasi tantangan termal pada pusat data AI berdensitas tinggi. Teknologi pendinginan cair langsung ke chip mampu menurunkan suhu prosesor secara signifikan dari 93°C menjadi 56°C pada beban penuh. Penurunan ini sangat penting

karena mencegah penurunan kinerja akibat panas berlebih dan memperpanjang umur komponen perangkat keras.

- b. Kedua, dari sisi konsumsi energi, pendinginan cair jauh lebih efisien dibandingkan pendinginan udara konvensional dengan penghematan energi mencapai 37 hingga 60 persen. Sistem ini mampu mencapai PUE di bawah 1,3, jauh lebih baik dibandingkan sistem pendingin udara yang umumnya berada pada rentang 1,5 hingga 1,8. Penghematan ini berdampak langsung pada penurunan biaya operasional pusat data.
- c. Ketiga, integrasi kecerdasan buatan dalam sistem manajemen termal memberikan nilai tambah yang signifikan. Sistem berbasis AI mampu melakukan kontrol prediktif dengan mengantisipasi lonjakan beban sebelum terjadi, mengoptimalkan aliran pendingin secara dinamis sesuai kebutuhan aktual, serta mendeteksi potensi kegagalan sistem dengan akurasi mencapai 92 persen. Hal ini meningkatkan keandalan sistem secara keseluruhan.
- d. Keempat, panas buangan dari sistem pendinginan cair yang memiliki suhu 45 hingga 55 derajat Celcius memiliki potensi pemanfaatan yang tinggi, dengan tingkat pemanfaatan mencapai 98 persen. Panas ini dapat digunakan untuk sistem pendinginan serapan yang mengurangi beban pendinginan mekanis hingga 80 persen, serta untuk pemanas distrik dan produksi air panas bagi kebutuhan hotel, rumah sakit, dan industri.
- e. Kelima, integrasi ketiga komponen utama yaitu pendinginan cair, kecerdasan buatan, dan pemanfaatan energi sisa menciptakan sistem manajemen termal yang holistik dan berkelanjutan. Melalui integrasi ini, pusat data tidak lagi hanya menjadi konsumen energi, tetapi bertransformasi menjadi prosumen yang berkontribusi pada dekarbonisasi infrastruktur digital dan mendukung pencapaian target pembangunan berkelanjutan.

5.2 Saran

5.2.1 Saran untuk Penelitian Lanjutan

Penelitian lebih lanjut perlu dilakukan untuk menentukan suhu operasi optimal yang menyeimbangkan antara kapasitas pendinginan dan efisiensi energi, karena suhu yang terlalu rendah dapat meningkatkan konsumsi energi secara signifikan. Selain itu, pengembangan sistem pendinginan hibrida yang menggabungkan pendinginan langsung ke chip dengan pendinginan imersi perlu dieksplorasi untuk mengakomodasi berbagai tingkat kepadatan daya dalam satu pusat data. Penelitian tentang material cold plate dengan

konduktivitas termal lebih tinggi dan fluida pendingin yang lebih efisien juga sangat diperlukan untuk meningkatkan kinerja perpindahan panas.

5.2.2 Saran untuk Implementasi Industri

Bagi pusat data yang sudah beroperasi, disarankan untuk melakukan adopsi teknologi secara bertahap melalui sistem hibrida dengan penukar panas di belakang rak sebelum beralih sepenuhnya ke pendinginan langsung ke chip. Peningkatan kompetensi teknisi dan operator pusat data dalam menangani sistem pendinginan cair juga sangat penting, termasuk prosedur darurat untuk penanganan kebocoran. Kolaborasi antara penyedia pusat data dengan pengguna panas buangan seperti hotel, rumah sakit, atau industri perlu dijalin untuk menciptakan ekosistem pemanfaatan energi sisa yang saling menguntungkan.

5.2.3 Saran untuk Kebijakan

Pemerintah dapat memberikan insentif fiskal bagi pusat data yang mengadopsi teknologi pendinginan cair dan memanfaatkan energi sisa, sejalan dengan target pengurangan emisi karbon nasional. Penetapan standar efisiensi energi minimum untuk pusat data, seperti target PUE maksimum, perlu dipertimbangkan untuk mendorong adopsi teknologi yang lebih efisien. Regulasi yang memfasilitasi integrasi pusat data dengan sistem energi kota juga perlu dikembangkan, misalnya melalui pemanfaatan panas buangan untuk pemanas distrik atau pendinginan perkotaan. Dukungan pemerintah untuk penelitian kolaboratif antara akademisi, industri, dan pemerintah dalam mengembangkan sistem manajemen termal yang sesuai dengan kondisi iklim dan kebutuhan Indonesia sangat diperlukan.

5.2.4 Saran Praktis untuk Operator Pusat Data

Operator pusat data disarankan untuk memulai dengan melakukan audit energi guna mengidentifikasi potensi penghematan dari sistem pendinginan yang ada. Uji coba skala kecil sebaiknya dilakukan sebelum implementasi penuh pada seluruh fasilitas. Investasi pada sistem monitoring berbasis Internet of Things dan kecerdasan buatan untuk kontrol real-time sangat dianjurkan. Kemitraan dengan pengguna panas di sekitar lokasi pusat data perlu dijalin untuk memaksimalkan pemanfaatan energi sisa. Terakhir, pemeliharaan preventif secara teratur harus direncanakan dengan baik untuk mencegah kegagalan sistem yang dapat menyebabkan downtime.

DAFTAR REFERENSI

Ma, S., Liu, Y., Liu, Y., Wang, J., Fang, Q., & Huang, Y. (2025). Artificial intelligence-enabled predictive energy saving planning of liquid cooling system for data centers. *Advanced Engineering Informatics*, 103283. Elsevier BV.

- Ma, S., Zhang, M., Cheng, S., Min, Y., Wang, J., & Xiao, J. (2026). End-edge-cloud collaborative-driven waste-heat prediction of liquid cooling system for high-performance computing data centers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 114165.
- Naug, A., et al. (2025). LC-Opt: Benchmarking Reinforcement Learning and Agentic AI for End-to-End Liquid Cooling Optimization in Data Centers. *arXiv preprint arXiv:2511.00116*. Submitted to NeurIPS 2025.
- Performance evaluation of two-phase direct-to-chip liquid cooling combined with air cooling for data centers. (2026). *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. ScienceDirect.
- Integrated Topology Optimization and AI Strategies for Liquid Cold Plate Thermal Management. (2025). *IEEE Conference Proceedings*. IEEE Xplore.
- HEATWISE Project: Holistic Energy management And Thermal Waste Integrated System for Energy optimization. (2025). *CORDIS - European Commission*. Project ID: 101138491.
- HEATWISE Project - Liquid cooling solutions for data centre efficiency with waste heat utilisation. (2026). *RISE Research Institutes of Sweden*.
- Ebrahimi, K., Jones, G. F., & Fleischer, A. S. (2014). Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration. *Applied Energy*, 139, 384-397.
- Chen, Y., et al. (2022). Multi-mode operation and thermo-economic analyses of combined cooling and power systems for recovering waste heat from data centers. *Energy Conversion and Management*, 266, 115820.
- Li, S., et al. (2021). Optimal schemes and benefits of recovering waste heat from data center for district heating by CO₂ transcritical heat pumps. *Energy Conversion and Management*, 245, 114591.
- Ljungdahl, V., et al. (2022). A decision support model for waste heat recovery systems design in data center and high-performance computing clusters utilizing liquid cooling and phase change materials. *Applied Thermal Engineering*, 201, 117671.
- Zhang, Q., et al. (2021). A survey on data center cooling systems: technology, power consumption modeling and control strategy optimization. *Journal of Systems Architecture*, 119, 102253.
- Shahi, M., et al. (2021). A comparative study of energy savings in a liquid-cooled server by dynamic control of coolant flow rate at server level. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 11(4), 616.
- Ecolab. (2025). 3D TRASAR™ for Direct-to-Chip Liquid Cooling - Real-time monitoring for data center cooling efficiency. *Diluncurkan di Data Center World Asia 2025*.
- Vertiv. (2025). Vertiv™ CoolLoop Trim Cooler - Solusi pendinginan untuk pusat data AI dan HPC. *Info Komputer*.
- STL Partners. (2025). Data center liquid cooling in 2025: Evidence, economics and the road to mainstream adoption.
- Data Center Dynamics. (2026). How hyperscalers are scaling direct-to-chip liquid cooling in Europe.
- Nvidia. (2026). Direct-to-chip liquid cooling for AI factories - Sustainability and performance benefits. *Yahoo Tech*.