

Studi Eksperimental Performa Perpindahan Kalor Sistem Pendinginan *Single Phase Immersion Cooling* untuk Data Center

Garda Naufal Janan¹, Indro Pranoto^{2*}, Fauzun³

Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada^{1,2,3}

Jl. Grafika No. 2 Kampus UGM, Sleman, Yogyakarta, 55281

e-mail: gardanufal2020@mail.ugm.ac.id¹, *indro.pranoto@ugm.ac.id², dan fauzun71@ugm.ac.id³

ABSTRACT

Data centres (DC) are nowadays a very important infrastructure. However, DC also consume about 3% of total global electricity, and this figure is expected to increase to 12%, of which 45% of DC electricity consumption is allocated to cooling systems. Therefore, the development and optimisation of cooling systems for DCs is a crucial concern. This research conducts experimental trials to evaluate the performance of cooling systems using the immersion cooling method in data centres. The data centre is placed in a chamber containing dielectric fluid that is flowed with the help of a pump. This research aims to compare the performance of the fan cooling method with immersion cooling. The results revealed that the CPU temperature is lower when using the immersion cooling method than fan cooling. In addition, the heat transfer coefficient value of immersion cooling is higher. Overall, the immersion cooling method showed more optimal cooling performance compared to the fan cooling method. In addition, based on the monitoring of electrical power efficiency through PUE values, immersion cooling proved to be more energy efficient than fan cooling. These findings confirm that immersion cooling can be a superior alternative cooling solution for DC, both in terms of thermal performance and energy efficiency, thus overcoming the challenges in conventional cooling systems.

Keywords: data center, dielectric fluid, energy saving, heat transfer, immersion cooling.

ABSTRAK

Data Center (DC) saat ini menjadi infrastruktur yang sangat penting. Namun, DC juga mengonsumsi sekitar 3% dari total listrik global, dan angka ini diperkirakan akan meningkat hingga 12%, di mana 45% dari konsumsi listrik DC dialokasikan untuk sistem pendinginan. Oleh karena itu, pengembangan dan pengoptimalan sistem pendingin untuk DC menjadi perhatian yang sangat krusial. Penelitian ini melakukan uji coba eksperimental untuk mengevaluasi kinerja sistem pendinginan menggunakan metode *immersion cooling* pada data center. Data center ditempatkan di dalam sebuah *chamber* yang berisi fluida dielektrik yang dialirkan dengan bantuan pompa. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja metode *fan cooling* dengan *immersion cooling*. Hasil penelitian mengungkapkan bahwa temperatur CPU lebih rendah ketika menggunakan metode *immersion cooling* dibandingkan *fan cooling*. Selain itu, nilai *heat transfer coefficient immersion cooling* lebih tinggi. Secara keseluruhan, metode *immersion cooling* menunjukkan performa pendinginan yang lebih optimal dibandingkan dengan metode *fan cooling*. Selain itu, berdasarkan pemantauan efisiensi daya listrik melalui nilai PUE, *immersion cooling* terbukti lebih hemat energi dibandingkan *fan cooling*. Temuan ini menegaskan bahwa *immersion cooling* dapat menjadi alternatif solusi pendinginan yang lebih unggul bagi DC, baik dari segi kinerja termal maupun efisiensi energi, sehingga mampu mengatasi tantangan dalam sistem pendinginan konvensional.

Kata kunci: data center, fluida dielektrik, *immersion cooling*, penghematan energi, perpindahan kalor.

PENDAHULUAN

Berkembangnya Industri 4.0 membuat data dalam jumlah besar disimpan setiap hari dan tren ini diperkirakan akan terus tumbuh secara eksponensial. Hal ini terjadi karena digitalisasi global yang sedang berlangsung di negara-negara maju dan berkembang. Jumlah data yang disimpan dan diproses sebesar 33 Zettabytes (33×10^{21} bytes) pada tahun 2018 menjadi 175 Zettabytes pada tahun 2025 [1]. Fasilitas tempat penyimpanan dan pemrosesan data disebut data center (DC). Data center adalah fasilitas yang digunakan untuk menempatkan dan mengelola beberapa jenis peralatan teknologi informasi (IT), termasuk namun tidak terbatas pada komputer bertenaga tinggi, server, dan peralatan jaringan [2].

DC mengonsumsi sekitar 3% listrik global pada tahun 2019. Angka ini diperkirakan akan meningkat sebesar 12% per tahun karena permintaan DC yang signifikan [3]. Hampir seluruh daya listrik ke komponen elektronik berubah menjadi energi panas. Hal ini harus dicegah agar peralatan dapat berfungsi dengan baik karena telah terbukti tingkat kegagalan peralatan elektronik meningkat secara eksponensial ketika

temperaturnya melebihi 75 °C [4]. Dalam sebuah DC, hanya 30% listrik yang benar-benar digunakan oleh perangkat fungsional, sementara 45% digunakan oleh sistem manajemen termal yang mencakup sistem pendingin udara, *chiller*, dan *humidifier* [5]. Jika dibandingkan dengan energi yang digunakan oleh sistem IT, konsumsi *cooling system* secara signifikan lebih besar. Oleh karena itu, perhatian terhadap pengembangan dan pengoptimalan *cooling system* untuk DC menjadi sangat penting.

DC secara tradisional menggunakan udara sebagai pembawa untuk mentransfer kapasitas pendinginan, karena biayanya yang rendah dan ketersediaannya yang mudah [6]. Akan tetapi, koefisien perpindahan kalor udara relatif tidak memuaskan, biasanya menyebabkan pendinginan yang tidak memadai dan *local hotspot* [7]. Sistem DC berpendingin udara tradisional tidak dapat mengelola panas secara efisien karena tingkat disipasinya yang tinggi. Oleh karena itu, konsumsi energi yang tinggi dan hilangnya kapasitas pendinginan merupakan kelemahan utama mereka. Selain itu, pendinginan udara memerlukan penggunaan kipas yang kuat dan penyediaan ruang di antara peralatan elektronik untuk menempatkan unit pendingin yang besar dan memungkinkan aliran udara yang cukup.

Meskipun sudah tersedia sistem pendinginan DC, namun masih ada kebutuhan mendesak untuk meningkatkan kemampuan pendinginan DC untuk mengatasi masalah seperti konsumsi daya dan temperatur penggunaan yang optimal. Alternatif yang muncul untuk pendinginan DC ini adalah teknologi *immersion cooling*. *Immersion cooling* merupakan metode pendinginan dengan cara merendam komponen elektronik ke dalam fluida dielektrik. *Immersion cooling* memungkinkan peningkatan kepadatan server untuk meningkatkan efisiensi komputasi. Secara efektif, *immersion cooling* mendorong pengembangan kebutuhan energi dan pengurangan kebisingan di DC [8]. Meskipun memiliki banyak kelebihan, penelitian mengenai penerapan *immersion cooling* untuk DC masih sangat minim di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas, performa perpindahan kalor, dan efisiensi konsumsi daya dari metode *immersion cooling* pada DC. Fluida dielektrik yang digunakan pada penelitian ini adalah S3X yang merupakan fluida berbasis hidrokarbon.

TINJAUAN PUSTAKA

Perpindahan Kalor Konveksi Paksa

Perpindahan panas konveksi paksa adalah mekanisme di mana panas ditransfer melalui fluida yang bergerak, yang pergerakannya dipaksa oleh alat eksternal. Dalam proses ini, fluida yang digunakan untuk mentransfer panas tidak bergerak secara alami karena perbedaan kepadatan yang dihasilkan oleh panas, tetapi melalui penggunaan alat yang membuat fluida tersebut bergerak secara mekanis seperti kipas, blower, atau pompa. Kualitas kinerja perpindahan kalor dapat diketahui melalui nilai *heat transfer coefficient* dan *thermal resistance*. *Heat transfer coefficient* merupakan nilai yang menunjukkan besarnya kalor yang berpindah dari sumber panas ke fluida pendingin melalui satuan luas dalam satuan waktu. Sementara itu, Persamaan *heat transfer coefficient* dapat dilihat pada Persamaan (1).

$$h = \frac{Q}{A_s \cdot (T_s - T_\infty)} \quad (1)$$

Dalam persamaan tersebut, Q merepresentasikan jumlah kalor yang dihasilkan oleh CPU, A_s menunjukkan luas permukaan CPU, T_s merupakan temperatur permukaan CPU, dan T_∞ adalah temperatur fluida di sekitar CPU.

Immersion Cooling

Seperti namanya, *immersion cooling* melibatkan perendaman komponen elektrik ke dalam fluida pendingin dielektrik. Fluida ini mengalir secara efisien untuk menyerap dan membuang panas yang dihasilkan oleh *chip*, mencegah server dari risiko panas berlebih [9]. *Immersion cooling* efektif mendinginkan seluruh permukaan dan memperbaiki keseragaman temperatur, mengurangi pemanasan lokal dibandingkan dengan *indirect cooling*. Efisiensi yang tinggi dapat dicapai melalui penggunaan media pendingin yang memiliki konduktivitas termal tinggi, viskositas rendah, dan kapasitas panas yang besar [10]. Contoh bahan dielektrik yang populer digunakan pada *immersion cooling* saat ini adalah *mineral oil* (MO), *virgin coconut oil*

(VCO), hidrofluoroeter, hidrokarbon, minyak silikon, dan air/glikol [11]. Metode pendinginan ini umumnya digunakan pada perangkat elektronik seperti *data center*, panel surya, baterai, dan trafo daya.

Power Usage Effectiveness (PUE)

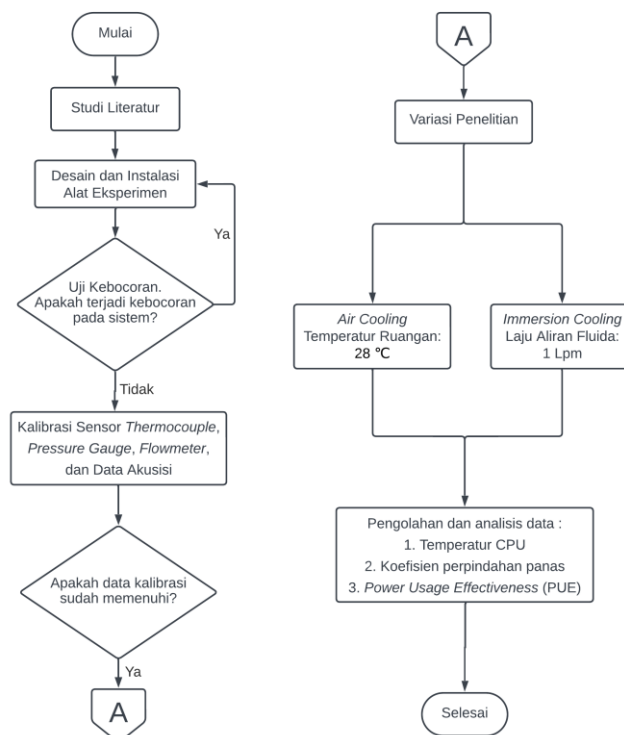
Power Usage Effectiveness (PUE) adalah rasio total energi yang digunakan oleh DC dengan energi yang digunakan untuk mengoperasikan peralatan IT (P_{IT}). Total energi listrik yang dikonsumsi DC merupakan yang meliputi P_{IT} , komponen pendingin ($P_{cooling}$), lampu, dll. Sementara itu, P_{IT} merupakan konsumsi energi listrik yang digunakan untuk menjalankan peralatan IT, seperti *processor*, *ram*, dan *hdd*. PUE digunakan secara luas untuk menentukan pemanfaatan dan distribusi sumber daya energi yang efisien di dalam DC. PUE digunakan secara luas untuk menentukan pemanfaatan dan distribusi sumber daya energi yang efisien di dalam DC [12]. PUE dirumuskan melalui Persamaan (2).

$$PUE = \frac{P_{IT} + P_{cooling}}{P_{IT}} \quad (2)$$

METODE

Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan secara langsung kinerja sistem pendinginan *single phase immersion cooling* dengan *air-fan cooling*. Pengujian *air-fan cooling* dilakukan pada temperatur ruangan 28 °C sedangkan pengujian *immersion cooling* dilakukan pada variasi laju aliran fluida 1 LPM. Diagram alir penelitian Studi Eksperimental Performa Perpindahan Kalor Sistem Pendinginan *Single Phase Immersion Cooling* untuk *Data Center* dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

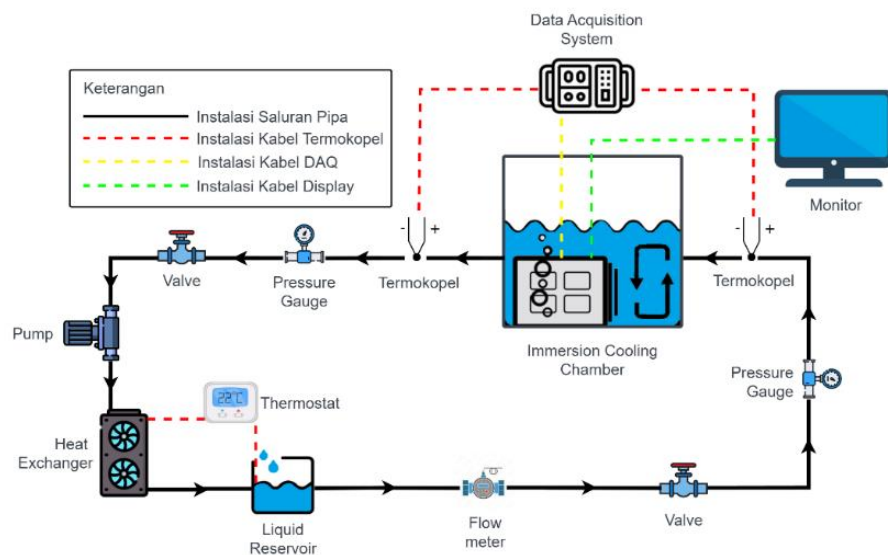
Fasilitas Penelitian

Fasilitas *DC Immersion Cooling Test* terdiri dari beberapa bagian, yang diklasifikasikan ke dalam sistem pengujian, sistem perpipaan fluida, serta sistem instrumentasi dan data. Sistem pengujian meliputi *DC immersion chamber*. Sistem perpipaan fluida meliputi pipa, sambungan pipa, pompa, *reservoir*, *heat*

exchanger, dan fluida kerja. Sistem instrumentasi mencakup *flowmeter*, *pressure gauge*, *thermocouple*, *data acquisition system*, *wattmeter*, dan monitor.

Fasilitas penelitian ini beroperasi dalam sistem *close-loop*. Ketika pompa diaktifkan, fluida kerja dari *DC immersion chamber* akan mengalir melalui *pressure gauge*, *heat exchanger*, *fluid reservoir*, dan *flowmeter* kemudian kembali ke *DC immersion chamber*. Laju aliran fluida kerja dikendalikan oleh pompa, yang dipengaruhi oleh daya listrik yang diatur melalui potensiometer.

Sumber panas dalam fasilitas penelitian ini berasal dari CPU pada DC yang menjalani *stress test* menggunakan aplikasi Cinebench R23. DC didinginkan dengan fluida kerja dielektrik melalui sistem pendinginan *single phase immersion cooling* dalam *DC immersion chamber*. Proses perpindahan kalor menyebabkan temperatur fluida kerja dielektrik meningkat, yang kemudian bergerak menuju *heat exchanger* untuk didinginkan menggunakan kipas. Setelah itu, fluida kembali ke *reservoir* dengan temperatur awalnya dan siap disirkulasikan kembali. Diagram skema fasilitas *DC Immersion Cooling Test* ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram skema fasilitas penelitian.

Bahan Penelitian

DC menjadi fokus utama dalam penelitian ini untuk mengetahui karakteristik peningkatan dan distribusi temperatur. DC yang digunakan pada penelitian ini adalah merek Lenovo tipe Thinksystem SR250 V2. DC ini merupakan server dengan ukuran 1U yang memiliki *processor* Intel Xeon E-2336. *Processor* tersebut memiliki TDP atau *heat generation* sebesar 65 W.

Dalam penelitian ini, fluida dielektrik yang digunakan adalah S3X, yang merupakan fluida berbasis hidrokarbon. Fluida ini dirancang khusus untuk operasi komputasi *blockchain* dengan menggunakan teknik *immersion cooling*. S3X menjadi komponen utama dalam penelitian ini karena memiliki nilai koefisien dielektrik yang tinggi, yang berfungsi untuk mencegah kontak aliran listrik selama penggunaan fasilitas. *Properties* dari S3X pada temperatur rata-rata *ambient* 28 °C dan tekanan 1 atm dapat dilihat pada Tabel 1.

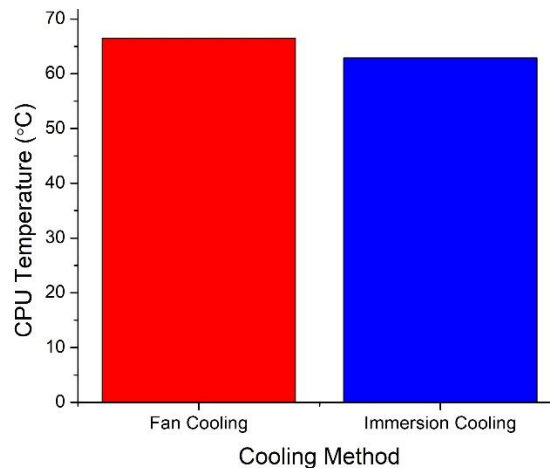
Tabel 1. Properties S3X

Density (kg/m ³)	808
Boiling Point (°C)	85,15
Dielectric Strength (kV)	30
Dynamic Viscosity (kg/m·s)	$7,9 \times 10^{-3}$
Specific Heat (J/kg·K)	2028
Thermal Conductivity (W/m·K)	0,143

Sumber: GTL-based immersion cooling fluids for blockchain mining applications [13]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Temperatur CPU

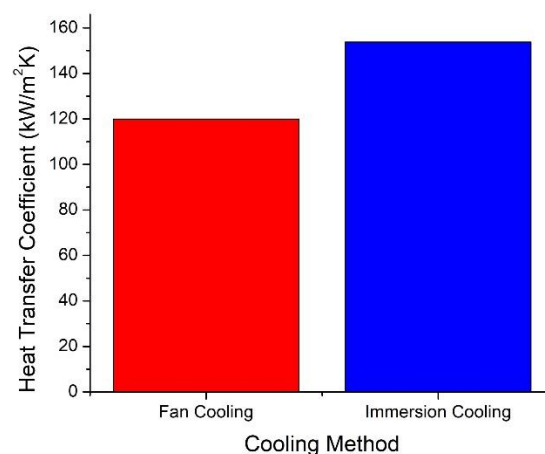


Gambar 3. Perbandingan temperatur CPU

Gambar 3 memperlihatkan bahwa metode *fan cooling* menghasilkan temperatur rata-rata CPU tertinggi sebesar 66,44 °C, diikuti oleh metode *immersion cooling* dengan laju aliran fluida 1 LPM sebesar 62,88 °C. Penurunan temperatur yang terjadi pada metode *immersion cooling* adalah sebesar 5,36% dibandingkan dengan metode *fan cooling*. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *immersion cooling* lebih efektif dalam menjaga suhu CPU dibandingkan dengan metode *fan cooling*.

Heat Transfer Coefficient

Kalor yang berpindah dari CPU ke fluida pendingin berbanding lurus dengan peningkatan energi pada fluida. Hal ini terjadi karena panas yang dihasilkan oleh CPU diserap oleh fluida yang mengalir di sekitarnya. Semakin besar jumlah kalor yang terserap oleh fluida, semakin kecil kenaikan temperatur yang dialami oleh CPU. Untuk mengukur efektivitas perpindahan kalor ini, digunakan parameter *heat transfer coefficient*.

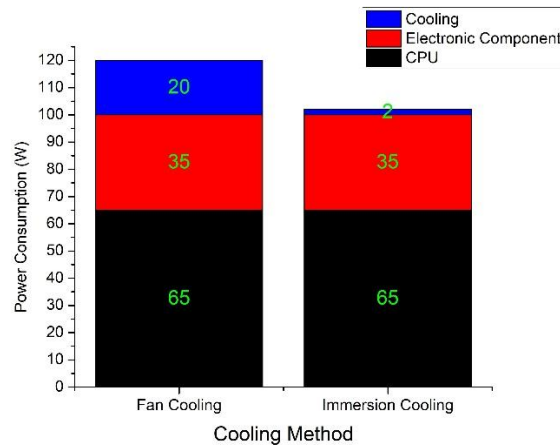


Gambar 4. Perbandingan *heat transfer coefficient*

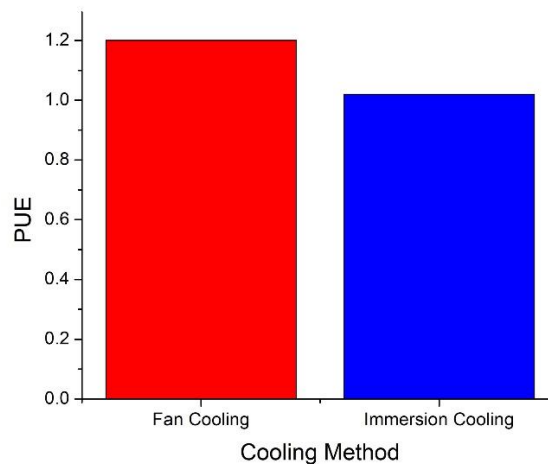
Gambar 4 memperlihatkan bahwa metode *fan cooling* menghasilkan *heat transfer coefficient* terendah sebesar 119,93 kW/m²K, diikuti oleh metode *immersion cooling* dengan laju aliran fluida 1 LPM sebesar 153,72 kW/m²K. Peningkatan *heat transfer coefficient* yang terjadi pada metode *immersion cooling* adalah sebesar 28,13% pada laju aliran 1 LPM dibandingkan dengan metode *fan cooling*. Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa *immersion cooling* lebih efektif dalam meningkatkan efisiensi perpindahan panas dibandingkan dengan *fan cooling*. Peningkatan ini dapat terjadi karena media pendingin fluida dielektrik yang memiliki *properties* perpindahan kalor yang lebih baik daripada udara.

Power Usage Effectiveness (PUE)

Power Usage Effectiveness (PUE) merupakan parameter yang digunakan untuk mengukur efisiensi konsumsi daya listrik pada DC. Dalam penelitian ini, karena DC yang digunakan tetap sama, perbedaan total konsumsi daya listrik pada berbagai laju aliran fluida hanya disebabkan oleh perbedaan daya yang dikonsumsi oleh komponen pendingin (kipas pada *fan cooling* dan pompa pada *immersion cooling*). Detail penggunaan daya listrik pada DC dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Konsumsi daya listrik DC



Gambar 6. Perbandingan PUE

Gambar 7 memperlihatkan perbandingan nilai PUE antara metode *fan cooling* dan *immersion cooling*. Metode *fan cooling* menghasilkan nilai PUE tertinggi sebesar 1,2, di mana konsumsi daya listrik untuk kipas berkontribusi sebesar 16,7% dari total konsumsi daya listrik pada data DC. Sementara itu, metode *immersion cooling* dengan laju aliran fluida sebesar 1 LPM menghasilkan nilai PUE sebesar 1,02, dengan konsumsi daya listrik untuk pompa hanya sebesar 1,6% dari total konsumsi daya listrik.

Penurunan nilai PUE pada metode *immersion cooling* mencapai 15% dibandingkan metode *fan cooling*. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *immersion cooling* tidak hanya menawarkan performa pendinginan yang lebih baik, tetapi juga lebih efisien dalam penggunaan daya listrik. Efisiensi yang lebih tinggi ini menjadikan metode *immersion cooling* sebagai solusi alternatif yang potensial untuk meningkatkan efisiensi energi pada sistem DC.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan eksperimen yang telah dilakukan, dapat disimpulkan hal-hal sebagai berikut:

1. Temperatur CPU ketika menggunakan metode *immersion cooling* lebih rendah sebesar 5,36% dibandingkan *fan cooling*.
2. *Heat transfer coefficient* ketika menggunakan metode *immersion cooling* lebih tinggi sebesar 28,13% dibandingkan *fan cooling*.
3. PUE ketika menggunakan metode *immersion cooling* lebih rendah sebesar 15% dibandingkan *fan cooling*.

Metode *immersion cooling* terbukti memiliki performa pendinginan yang lebih baik dibandingkan dengan metode *fan cooling*, baik dari segi efektivitas perpindahan panas maupun efisiensi penggunaan daya listrik. Hasil ini memperkuat potensi *single-phase immersion cooling* sebagai solusi alternatif yang lebih hemat energi untuk mengatasi tantangan tingginya konsumsi daya listrik pada sistem *data center* di masa depan.

ACKNOWLEDGMENT

Penelitian ini didanai oleh Hibah Penelitian Tesis Magister Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia Tahun 2024 berdasarkan Surat Keputusan Nomor 0459/E5/PG.02.00/2024 dan Perjanjian/Kontrak Nomor 048/E5/PG.02.00.PL/2024. Penelitian ini juga merupakan kerja sama dengan PT. Shell Indonesia berdasarkan Perjanjian Kontrak untuk Penggunaan Layanan Profesional Nomor 1261209/UN1/FTK/LKFT/HK.08.00/2024.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Reinsel, J. Gantz, dan J. Rydning, "The Digitization of the World From Edge to Core (Data refreshed May 2020)," Framingham, Mei 2020.
- [2] A. A. Alkrush, M. S. Salem, O. Abdelrehim, dan A. A. Hegazi, "Data centers cooling: A critical review of techniques, challenges, and energy saving solutions," 1 April 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijrefrig.2024.02.007.
- [3] M. Koot dan F. Wijnhoven, "Usage impact on data center electricity needs: A system dynamic forecasting model," *Appl Energy*, vol. 291, Jun 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116798.
- [4] P. Taddeo, J. Román, J. Summers, J. Gustafsson, I. Martorell, dan J. Salom, "Experimental and numerical analysis of the thermal behaviour of a single-phase immersion-cooled data centre," *Appl Therm Eng*, vol. 234, Nov 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121260.
- [5] J. Huang, C. Chen, G. Guo, Z. Zhang, dan Z. Li, "A Calculation Model for Typical Data Center Cooling System," dalam *Journal of Physics: Conference Series*, Institute of Physics Publishing, Agu 2019. doi: 10.1088/1742-6596/1304/1/012022.
- [6] S. Cai dan Z. Gou, "Towards energy-efficient data centers: A comprehensive review of passive and active cooling strategies," *Energy and Built Environment*, 2024, doi: 10.1016/j.enbenv.2024.08.009.
- [7] M. Azarifar, M. Arik, dan J. Y. Chang, "Liquid cooling of data centers: A necessity facing challenges," 15 Juni 2024, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123112.
- [8] M. Lionello, M. Rampazzo, A. Beghi, D. Varagnolo, dan M. Vesterlund, "Graph-based modelling and simulation of liquid immersion cooling systems," *Energy*, vol. 207, hlm. 118238, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118238>.
- [9] I. W. Kuncoro, N. A. Pambudi, M. K. Biddinika, dan C. W. Budiyo, "Optimization of immersion cooling performance using the Taguchi Method," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, hlm. 100729, Okt 2020, doi: 10.1016/J.CSITE.2020.100729.
- [10] P. Chen, S. Harmand, dan S. Ouenzerfi, "Immersion cooling effect of dielectric liquid and self-wetting fluid on smooth and porous surface," *Appl Therm Eng*, vol. 180, hlm. 115862, Nov 2020, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2020.115862.
- [11] R. Febriyanto, H. M. Ariyadi, I. Pranoto, dan M. A. Rahman, "Experimental study of serpentine channels immersion cooling for lithium-ion battery thermal management using single-phase dielectric fluid," *J Energy Storage*, vol. 97, Sep 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112799.
- [12] M. Hnayno, A. Chehade, H. Klabi, G. Polidori, dan C. Maalouf, "Experimental investigation of a data-centre cooling system using a new single-phase immersion/liquid technique," *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 45, Mei 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.102925.
- [13] P. V. Shivaprasad, C. Cross, J. Carty, D. Gonzalez, dan J. Avolio, "GTL-based immersion cooling fluids for blockchain mining applications," 2024.