

ANALISIS LITERATUR PERBANDINGAN KINERJA NANOFLUID DAN FLUIDA KONVENSIONAL PADA SISTEM PERPINDAHAN PANAS

Muchamad Rifaldi Mahendar¹, Muhamad Syafii², Althesa Androva³
muchamad.rifaldi@gmail.com¹
Universitas PGRI Semarang

ABSTRAK

Kebutuhan akan sistem pendinginan yang efisien pada perangkat elektronik dan mesin industri mendorong pencarian fluida kerja alternatif. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja nanofluid (Al_2O_3 dan CuO) dengan fluida konvensional (air dan minyak) pada sistem perpindahan panas dengan geometri kompleks melalui metode Systematic Literature Review (SLR). Literatur dari tahun 2016 hingga 2026 dianalisis berdasarkan parameter konduktivitas termal, gaya inersia, dan Performance Evaluation Criterion (PEC). Hasil analisis menunjukkan bahwa nanofluid mampu meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif sebesar 15% hingga 40% yang dipicu oleh gerak Brown. Namun, peningkatan viskositas menyebabkan kenaikan daya pompa sebesar 10-25%. Meskipun demikian, nilai PEC yang umumnya di atas 1,0 menunjukkan bahwa nanofluid tetap lebih menguntungkan untuk aplikasi industri selama stabilitas campuran terjaga untuk menghindari aglomerasi.

Kata Kunci: Nanofluid, Perpindahan Panas, Geometri Kompleks, Daya Pompa, PEC.

ABSTRACT

The increasing demand for efficient cooling systems in electronic devices and industrial machinery has driven the search for alternative working fluids. This study aims to compare the performance of nanofluids (Al_2O_3 and CuO) with conventional fluids (water and oil) in heat transfer systems with complex geometries through a Systematic Literature Review (SLR). Literature from 2016 to 2026 was analyzed based on parameters such as thermal conductivity, inertial forces, and the Performance Evaluation Criterion (PEC). The results indicate that nanofluids can enhance the convective heat transfer coefficient by 15% to 40%, triggered by Brownian motion. However, the increase in viscosity leads to a rise in pumping power by 10% to 25%. Nevertheless, PEC values generally exceeding 1.0 demonstrate that nanofluids remain more advantageous for industrial applications, provided that mixture stability is maintained to prevent agglomeration.

Keywords: Nanofluid, Heat Transfer, Complex Geometry, Pumping Power, PEC.

PENDAHULUAN

Saat ini kebutuhan akan sistem pendingin yang cepat dan efisien sangatlah tinggi, mulai dari mesin kendaraan hingga perangkat elektronik yang semakin kecil dan semakin mudah panas. Masalah utamanya adalah fluida pendingin yang biasa dipakai, seperti air atau minyak yang mempunyai keterbatasan alami yaitu sulit menghantarkan panas dengan cepat (Sajid & Ali, 2019). hal ini membuat banyak peneliti mencari cara bagaimana agar fluida ini bisa bekerja lebih maksimal.

Salah satu solusi yang paling populer dalam sepuluh tahun terakhir adalah penggunaan nanofluid. Sederhananya, mencampurkan partikel logam yang sangat kecil (nano) dalam air atau minyak tersebut. Menurut penelitian dari Minea dkk.(2022), partikel-partikel nano ini membantu membawa panas lebih baik karena mereka bergerak aktif di dalam cairan, sehingga suhu bisa turun lebih cepat dibanding hanya menggunakan air biasa.

Namun, menggunakan nanofluid tidak selalu mudah, apalagi pada sistem yang bentuk salurannya rumit atau berliku-liku. Akibatnya, mesin pompa harus bekerja lebih keras dan boros listrik (Hassan dkk., 2018). oleh karena itu para ahli sering menggunakan rumus bilangan nusselt (Nu) untuk melihat kenaikan daya serap panasnya sebanding dengan beban

pompanya (Bumataria dkk., 2023).

Analisis literatur ini dibuat untuk membandingkan mana yang lebih untung antara fluida konvensional yang lebih murah tapi lambat, atau beralih ke nanofluid yang hebat tetapi punya resiko teknis. Fokus utamanya adalah melihat bagaimana perbandingan kinerja keduanya pada sistem yang kompleks agar dapat diketahui kapan waktu yang tepat untuk memakai teknologi ini di industri (Al-Waeli dkk., 2020).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dan kuantitatif melalui tinjauan literatur sistematis (Systematic Literature Review). Tujuannya adalah untuk mengumpulkan, mengevaluasi, dan menyimpulkan data dari berbagai penelitian sebelumnya mengenai perbandingan performa nanofluid dan fluida konvensional pada sistem perpindahan panas yang kompleks.

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini sebagai berikut:

Strategi Pencarian Data

Pencarian literatur dilakukan pada basis data akademik utama seperti Google Scholar, ScienceDirect, Scopus, dan SpringerLink. Kata kunci yang digunakan dalam pencarian meliputi: “nanofluid performance”, “heat transfer enhancement”, “complex geometry”, “pressure drop”, dan Al_2O_3 Vs CuO . Pencarian dibatasi pada artikel jurnal dan prosiding konferensi yang diterbitkan dalam rentang waktu 2016 hingga 2026 untuk memastikan data yang dianalisis tetap relevan dengan perkembangan teknologi terbaru (Minea et al., 2022).

Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Untuk menjaga kualitas analisis, dilakukan penyaringan dokumen berdasarkan kriteria tertentu:

Inklusi penelitian harus menyajikan perbandingan langsung antara nanofluid dan fluida dasar (seperti air atau minyak), menggunakan sistem dengan geometri kompleks (seperti saluran berliku atau pipa bersirip), dan mencantumkan data numerik atau eksperimental yang jelas (Sajid & Ali, 2019).

Eksklusi artikel yang hanya membahas sifat termofisika tanpa pengujian perpindahan panas, serta artikel yang tidak menyediakan data pressure drop atau viskositas, akan dilakukan dari tinjauan ini.

Parameter Analisis

Data yang telah dikumpulkan kemudian diolah dan dikelompokkan berdasarkan parameter kinerja utama, yaitu:

1. Peningkatan Konduktivitas Termal, bagaimana pengaruh fraksi volume nanopartikel terhadap kemampuan hantar panas.
2. Bilangan Reynolds (Re) dan Inersia, Menganalisis bagaimana gaya inersia ditingkatkan untuk melawan hambatan viskositas pada aliran kompleks (Hassan et al., 2018).
3. Performance Evaluation Criteriuon (PEC), Rasio efektivitas termal terhadap kerugian tekanan pompa sebagai indikator kelayakan industri (Bumataria et al., 2023).

Analisis Data dan Sintesis

Data dianalisis secara komparatif dengan membandingkan hasil temuan antar peneliti. Ketidak konsistenan data seperti perbedaan hasil antara studi eksperimental dan simulasi numerik akan diidentifikasi untuk melihat adanya pengaruh faktor eksternal seperti aglomerasi partikel atau ketidakstabilan surfaktan (Bashir et al., 2024). Kesimpulan diambil berdasarkan tren dominan yang muncul dari mayoritas literatur yang ditinjau.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan analisis terhadap berbagai literatur yang dikumpulkan, terdapat beberapa poin utama yang menjadi pembeda signifikan antara penggunaan nanofluid dan fluida konvensional dalam sistem perpindahan panas yang kompleks.

Analisis komparatif terhadap hasil temuan antar peneliti dilakukan untuk mengidentifikasi tren dominan serta ketidak konsistenan data dalam penggunaan nanofluid pada geometri kompleks. Ringkasan analisis tersebut dapat dilihat pada tabel di bawah ini:

Tabel 1. Tabel perbandingan Literature Review penggunaan nanofluid pada geometri kompleks

Penulis dan Tahun	Fokus Penelitian	Temuan Utama	Parameter Kinerja
Minea et al. (2022)	Performa nanopartikel Al_2O_3 dan CuO	Kenaikan koefisien perpindahan panas 15%-40%	Gerak <i>Brown</i> & Konveksi
Hassan et al. (2018)	Sistem dengan saluran rumit/berliku	Gaya inersia pada Re tinggi mampu memecah <i>boundary layer</i>	Bilangan <i>Reynolds</i> (Re)
Bumataria et al. (2023)	Efisiensi termal vs beban pompa	Kenaikan daya pompa sebesar 10%-25% di industri	Bilangan <i>Nusselt</i> (Nu) & <i>PEC</i>
Sajid & Ali (2019)	Keterbatasan fluida dasar	Fluida konvensional bersifat pasif dibandingkan gerakan aktif partikel nano	Konduktivitas Termal
Bashir et al. (2024)	Risiko teknis pada saluran sempit	Konsentrasi >5% berisiko menyebabkan aglomerasi/penyumbatan	Stabilitas & Viskositas
Al-Waeli et al. (2020)	Kelayakan implementasi industri	Nilai $PEC > 1,0$ membuktikan penghematan energi tetap tercapai	<i>PEC</i>

Peningkatan Konduktivitas Termal dan Efektivitas Panas

Hampir semua literatur sepakat bahwa nanofluid memiliki kemampuan hantar panas yang jauh lebih baik daripada air atau minyak biasa. Sebagai contoh, penggunaan nanopartikel Al_2O_3 dan CuO secara konsisten meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif antara 15% hingga 40% tergantung pada konsentrasi campurannya (Minea et al., 2022).

Hal ini terjadi karena adanya gerakan mikro dari partikel-partikel nano yang disebut gerak Brown. Gerakan acak ini menciptakan gangguan kecil pada aliran fluida yang membantu menyebarkan panas lebih merata ke seluruh aliran, sesuatu yang tidak bisa dilakukan oleh fluida konvensional yang cenderung "pasif" (Sajid & Ali, 2019).

Pengaruh Geometri Kompleks dan Gaya Inersia

Pada sistem dengan saluran yang tidak beraturan atau berliku (complex geometry), gaya inersia memegang peranan kunci. Literatur menunjukkan bahwa pada bilangan Reynolds (Re) yang tinggi, gaya inersia nanofluid mampu memecah lapisan batas (boundary layer) yang biasanya menghambat perpindahan panas pada dinding pipa (Hassan et al., 2018).

Namun, ada temuan menarik, pada saluran yang sangat sempit atau berliku tajam, penggunaan nanofluid dengan konsentrasi terlalu tinggi (di atas 5%) justru berisiko

menyebabkan penumpukan partikel atau aglomerasi. Hal ini malah bisa menyumbat aliran dan menurunkan performa sistem secara keseluruhan (Bashir et al., 2024).

Penurunan Tekanan (Pressure Drop)

Meskipun panasnya cepat hilang, hampir semua peneliti mencatat bahwa nanofluida jauh lebih kental daripada fluida konvensional. Kenaikan viskositas ini menyebabkan pressure drop yang signifikan. Menurut Bumataria et al. (2023), dalam sistem penukar panas industri, kenaikan efisiensi termal sering kali dibarengi dengan kenaikan daya pompa sebesar 10-25%.

Untuk mensiasati hal ini, para peneliti menyarankan penggunaan fluida hibrida (campuran dua jenis nanopartikel) yang terbukti bisa memberikan performa termal tinggi namun dengan kenaikan viskositas yang lebih terkendali dibandingkan hanya menggunakan satu jenis nanopartikel saja.

Evaluasi Performa (PEC)

Jika dilihat dari nilai Performance Evaluation Criterion (PEC), penggunaan nanofluida pada sistem kompleks umumnya memberikan nilai di atas 1,0. Ini membuktikan bahwa meskipun ada beban pompa tambahan, keuntungan dari penghematan energi melalui pendinginan yang lebih cepat tetap lebih besar daripada kerugian akibat gesekan fluida (Al-Waeli et al., 2020).

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan literatur sistematis terhadap perbandingan kinerja nanofluida dan fluida konvensional pada sistem perpindahan panas dengan geometri kompleks, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Keunggulan Performa Termal: Nanofluida, khususnya yang berbasis Al_2O_3 dan CuO , memiliki keunggulan performa yang mutlak dibandingkan fluida konvensional (air dan minyak) dengan peningkatan koefisien perpindahan panas konvektif sebesar 15% hingga 40%.
2. Mekanisme Peningkatan: Peningkatan efisiensi termal ini didorong oleh fenomena gerak Brown, di mana pergerakan acak partikel nano menciptakan gangguan mikro yang mempercepat distribusi panas secara aktif dibandingkan fluida dasar yang bersifat pasif.
3. Interaksi Geometri dan Aliran: Pada sistem dengan geometri kompleks, penggunaan nanofluida pada bilangan Reynolds yang tinggi sangat efektif karena gaya inersia yang dihasilkan mampu memecah lapisan batas (boundary layer) yang menjadi penghambat utama perpindahan panas.
4. Konsekuensi Mekanis: Implementasi nanofluida menyebabkan peningkatan viskositas yang berdampak pada kenaikan daya pompa sebesar 10% hingga 25% akibat penurunan tekanan (pressure drop) yang lebih tinggi dibandingkan fluida konvensional.
5. Kelayakan Industri: Meskipun beban kerja pompa meningkat, penggunaan nanofluida pada sistem kompleks tetap dinyatakan layak secara teknis dan energi karena nilai Performance Evaluation Criterion (PEC) yang secara konsisten berada di atas 1,0.
6. Batasan Operasional: Stabilitas campuran merupakan aspek kritis, di mana penggunaan konsentrasi nanopartikel di atas 5% pada saluran sempit berisiko menyebabkan aglomerasi atau penyumbatan yang dapat menurunkan performa sistem secara keseluruhan.

Saran

1. Pengembangan Fluida Hibrida: Penelitian selanjutnya disarankan untuk lebih mengeksplorasi penggunaan hybrid nanofluida guna mendapatkan efisiensi termal yang tinggi dengan peningkatan viskositas yang lebih terkendali.

2. Stabilitas Jangka Panjang: Diperlukan studi lebih lanjut mengenai penggunaan jenis surfaktan yang optimal untuk menjaga stabilitas dispersi nanopartikel dalam penggunaan jangka panjang di lingkungan industri.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Waeli, A. H. A., Sopian, K., Kazem, H. A., & Chaichan, M. T. (2020). Nanofluid based grid connected PV/T systems in Malaysia: A techno-economic guide. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40, 100767.
- Aravind, B., & Ramalingam, S. (2023). Experimental investigation on the heat transfer characteristics of Al₂O₃ and CuO nanofluids in a serpentine heat exchanger. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 142, 106654.
- Bashir, M. A., Ibrahim, S., & Ahmed, A. (2024). Particle agglomeration and its impact on the thermal performance of nanofluids in microchannels: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 395, 123841.
- Bumataria, R. K., Chavda, N. K., & Shah, H. S. (2023). Performance Evaluation Criterion (PEC) of hybrid nanofluids in industrial heat exchangers: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175, 113178.
- Hassan, M., Marin, M., Alsharif, A., & Ellahi, R. (2018). Convective heat transfer and pressure drop of nanofluid in a wavy channel: Numerical and experimental approach. *Applied Sciences*, 8(12), 2457.
- Huminic, G., & Huminic, A. (2020). Entropy generation of nanofluids in heat exchangers with complex geometries: A review. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122676.
- Ibrahim, S. M., & Gad, H. E. (2021). Improving the thermal performance of shell and tube heat exchanger using different types of nanofluids. *Engineering Research Journal*, 44(2), 153-162.
- Kherbeet, A. S., Mohammed, H. A., & Salman, B. H. (2016). The effects of nanofluids flow on mixed convection heat transfer over microscale backward-facing step. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 75, 168-176.
- Li, Y., & Xuan, Y. (2022). Brownian motion and its role in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A molecular dynamics study. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 185, 122391.
- Minea, A. A., et al. (2022). Nanofluids for solar energy applications: A review of recent advances and future directions. *Journal of Cleaner Production*, 330, 129841.
- Mohammed, H. A., Al-asadi, M. T., & Shuaib, N. H. (2017). Heat transfer and fluid flow characteristics of nanofluids in a helically coiled tube: A numerical study. *International Journal of Thermal Sciences*, 111, 149-163.
- Mukherjee, S., & Jana, S. (2021). Stability and rheological behavior of Al₂O₃ and CuO water-based nanofluids: The effect of surfactant concentration. *Powder Technology*, 380, 115-125.
- Sajid, M. U., & Ali, H. M. (2019). Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. *Powder Technology*, 326, 113-140.
- Sarafraz, M. M., & Hormozi, F. (2016). Comparative study on the thermal performance of a counter-current heat exchanger using water, biological and carbon-based nanofluids. *Applied Thermal Engineering*, 103, 1182-1191.
- Sarkar, J., Ghosh, P., & Adil, A. (2015). A review on hybrid nanofluids: Recent research and present challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 164-177.
- Sharifpur, M., Yousefi, S., & Meyer, J. P. (2018). A new model for thermal conductivity of nanofluids by considering the Brownian motion. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 91, 130-137.
- Sidik, N. A. C., et al. (2017). A review on preparation methods and challenges of nanofluids. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 82, 118-130.
- Sundar, L. S., Singh, M. K., & Sousa, A. C. (2016). Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT/water nanofluids in a tube with longitudinal strip inserts. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 71, 121-129.

- Toghraie, D., Chaharkoki, V., & Sarafraz, M. M. (2021). Measurement of thermal conductivity of ZnO-TiO₂/EG hybrid nanofluid: Effects of temperature and concentration. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 143, 2263-2274.
- Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58-64.