

# Analisis Perbandingan Efektivitas Pendinginan Radiator Menggunakan Variasi Nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Air pada Sistem Pendingin Mesin Mobil

Taufiq Hidayatno<sup>1\*</sup>, Muhamad Safi'i<sup>2</sup>, Althesa Androva<sup>3</sup>,

<sup>1</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang ;  
email : [taufiqhidayatno76@gmail.com](mailto:taufiqhidayatno76@gmail.com)

<sup>2</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang;  
email : [muhamadsafii@upgris.ac.id](mailto:muhamadsafii@upgris.ac.id)

<sup>3</sup> Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Persatuan Guru Republik Indonesia, Semarang;  
email : [althesaandrova@upgris.ac.id](mailto:althesaandrova@upgris.ac.id)

**Abstract:** The engine cooling system plays a crucial role in maintaining the engine's working temperature within an optimal range. This study aims to analyze and compare the cooling effectiveness of a radiator using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid at 0.3% volume concentration against water as a conventional coolant. Tests were conducted on an automotive engine at engine speed variations of 1000, 1500, 2000, 2500, and 3000 RPM. Measured parameters included radiator inlet and outlet temperatures, mass flow rate, and heat transfer efficiency. Results show that 0.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid achieved an average cooling effectiveness of 19.16%, compared to 15.53% for water. The 4.6% increase in thermal conductivity of the nanofluid contributed significantly to improved heat transfer in the radiator. This study concludes that 0.3% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid is an effective alternative for improving automotive engine cooling system performance.

**Keywords:** Nanofluid; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Radiator; Thermal Conductivity; Cooling Effectiveness.

**Abstrak:** Sistem pendingin mesin memiliki peranan krusial dalam menjaga temperatur kerja mesin agar tetap berada dalam rentang optimal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan efektivitas pendinginan radiator menggunakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada konsentrasi volume 0,3% terhadap air sebagai fluida pendingin konvensional. Pengujian dilakukan pada mesin mobil dengan variasi putaran mesin 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 RPM. Parameter yang diukur meliputi temperatur masuk dan keluar radiator, laju aliran massa, serta efisiensi perpindahan panas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3% mampu meningkatkan efektivitas pendinginan rata-rata sebesar 19,16% dibandingkan air yang hanya mencapai 15,53%. Peningkatan konduktivitas termal sebesar 4,6% pada nanofluida berkontribusi signifikan terhadap peningkatan perpindahan panas di radiator. Penelitian ini menyimpulkan bahwa nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada konsentrasi 0,3% merupakan alternatif yang efektif untuk meningkatkan performa sistem pendingin mesin otomotif.

**Kata kunci:** Nanofluida; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Radiator; Konduktivitas Termal; Efektivitas Pendinginan.

Diterima: May04, 2026  
Direvisi: May22, 2026  
Diterima: May 24, 2026  
Diterbitkan: July 2, 2026  
Versi sekarang: July 8, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.  
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

## 1. Pendahuluan

Sistem pendingin mesin merupakan salah satu komponen vital pada kendaraan bermotor yang berfungsi untuk mengontrol dan mempertahankan temperatur kerja mesin dalam kondisi optimal. Panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar di dalam silinder mesin harus dikelola dengan baik untuk mencegah kerusakan komponen akibat overheating [1], [2]. Radiator sebagai komponen utama dalam sistem pendingin berperan mendisipasi panas dari fluida pendingin ke lingkungan sekitar melalui mekanisme konveksi paksa. Fluida

pendingin konvensional yang umum digunakan adalah air dan campuran etilen glikol. Meskipun kedua fluida ini telah terbukti efektif dalam jangka panjang, terdapat keterbatasan dalam hal konduktivitas termal. Air memiliki konduktivitas termal sekitar  $0,613 \text{ W/m}\cdot\text{K}$  pada temperatur  $25^\circ\text{C}$ , yang dalam kondisi operasi mesin dengan beban tinggi terkadang belum cukup untuk membuang panas secara efisien. Hal ini dapat menyebabkan temperatur mesin melebihi batas aman, meningkatkan konsumsi bahan bakar, serta mempercepat keausan komponen [3].

Perkembangan teknologi nanomaterial dalam dekade terakhir telah membuka peluang baru dalam rekayasa fluida termal. Nanofluida, yang merupakan suspensi stabil nanopartikel berukuran  $1\text{--}100 \text{ nm}$  dalam fluida dasar, telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam sifat perpindahan panas [4]. Nanopartikel alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) menjadi salah satu material yang paling banyak diteliti karena ketersediaannya yang melimpah, stabilitas kimia yang baik, konduktivitas termal yang tinggi ( $36 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ), serta biaya produksi yang relatif terjangkau. Beberapa penelitian sebelumnya telah membuktikan potensi nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  sebagai fluida pendingin yang superior. Pertama kali memperkenalkan konsep nanofluida dan melaporkan peningkatan konduktivitas termal yang signifikan. Penelitian Pak dan Cho (1998) menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan konsentrasi  $1\text{--}3\%$  dapat meningkatkan konduktivitas termal hingga  $7\text{--}12\%$ . Lebih lanjut, [5], melaporkan peningkatan koefisien konveksi pada aliran turbulen di dalam pipa dengan menggunakan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  [6].

Pemilihan konsentrasi volume  $0,3\%$  dalam penelitian ini didasarkan pada pertimbangan bahwa konsentrasi rendah dapat meminimalkan efek peningkatan viskositas yang dapat meningkatkan konsumsi daya pompa, sekaligus tetap memberikan peningkatan konduktivitas termal yang berarti. [7], menemukan bahwa konsentrasi  $0,3\%$  memberikan keseimbangan optimal antara peningkatan perpindahan panas dan peningkatan viskositas. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) Menganalisis karakteristik perpindahan panas nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $0,3\%$  pada sistem radiator mesin mobil; (2) Membandingkan efektivitas pendinginan antara nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$   $0,3\%$  dengan air pada berbagai kondisi putaran mesin; (3) Menentukan peningkatan performa pendinginan yang dapat dicapai dengan penggunaan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada sistem pendingin otomotif [8].

## 2. Tinjauan Literatur

### 2.1 Nanofluida sebagai Fluida Pendingin Generasi Baru

Perkembangan teknologi *nanomaterial* telah melahirkan konsep baru dalam rekayasa fluida termal, yaitu nanofluida suatu suspensi koloid stabil yang terdiri atas nanopartikel berukuran  $1\text{--}100 \text{ nm}$  yang terdispersikan ke dalam fluida dasar seperti air atau *ethylene glycol*. Keunggulan utama nanofluida terletak pada peningkatan konduktivitas termal yang signifikan dibandingkan fluida konvensional, sehingga menjadikannya kandidat unggul untuk aplikasi perpindahan panas intensif, termasuk sistem pendingin otomotif. Dalam kajian yang dilakukan pada *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, karakteristik perpindahan panas nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -air pada radiator *plate-fin* dengan *offset strip fins* berhasil dikuantifikasi secara eksperimental dan dimodelkan menggunakan pendekatan *Artificial Neural Network* (ANN) serta *Physics-Informed Neural Network* (PINN). Studi tersebut menegaskan bahwa konsentrasi nanopartikel, laju aliran, dan temperatur masuk merupakan variabel penentu utama performa radiator [9]. Perbedaan mendasar dengan penelitian ini terletak pada penggunaan mesin otomotif nyata sebagai sumber panas dan variasi putaran mesin (RPM) sebagai parameter independen utama, bukan variasi laju aliran secara terisolasi [4], [7], [10], [11].

### 2.2 Pengaruh Konsentrasi Nanopartikel terhadap Perpindahan Panas Radiator

Konsentrasi volume nanopartikel merupakan faktor kritis yang menentukan keseimbangan antara peningkatan konduktivitas termal dan penambahan viskositas dinamis. Penelitian yang dipublikasikan pada *Applied Thermal Engineering* menunjukkan bahwa nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada konsentrasi rendah dalam *plate heat exchanger* kompak mampu meningkatkan konduktivitas termal hingga  $9,1\%$  dan koefisien perpindahan panas konvektif hingga  $27\%$  dibandingkan fluida dasar, dengan peningkatan tekanan jatuh yang relatif kecil. Temuan ini secara kuat mendukung pemilihan konsentrasi  $0,3\%$  yang diterapkan dalam penelitian ini sebagai titik optimal antara performa termal dan beban pompa sirkulasi. Lebih lanjut, studi oleh yang terbit di *Scientific Reports* menguji nanofluida hibrida MWCNT-

$\text{Al}_2\text{O}_3$ /air pada radiator kendaraan nyata dan melaporkan peningkatan koefisien perpindahan panas konvektif sebesar 28,5%, efektivitas 22,54%, serta bilangan *Nusselt* 23,74% dibandingkan air murni. Penelitian tersebut menggunakan dua variasi temperatur masuk (60°C dan 80°C), sedangkan penelitian ini secara lebih representatif menggunakan kondisi operasi mesin aktual dengan temperatur masuk yang bervariasi secara alami sesuai putaran mesin, sehingga mencerminkan skenario penggunaan kendaraan yang lebih realistis [12].

### 2.3 Stabilitas Nanofluida dan Peran Surfaktan

Stabilitas dispersi nanopartikel dalam fluida dasar merupakan prasyarat teknis yang menentukan keandalan nanofluida dalam aplikasi jangka panjang. Aglomerasi dan sedimentasi nanopartikel dapat menurunkan performa termal secara signifikan sekaligus menyebabkan potensi penyumbatan pada saluran sempit radiator. Penggunaan surfaktan anionik seperti *Sodium Dodecylbenzene Sulfonate* (SDBS) terbukti efektif meningkatkan stabilitas dispersi melalui mekanisme gaya tolak elektrostatik antarnanopartikel. Kajian yang terbit di *Journal of Molecular Liquids* mengonfirmasi bahwa nanofluida ternary yang disiapkan dengan metode *two-step* menggunakan surfaktan SDBS menunjukkan stabilitas superior yang terukur melalui nilai potensial zeta dan analisis *Dynamic Light Scattering* (DLS) selama periode penuaan yang diperpanjang [13]. Nilai potensial zeta di atas  $\pm 30$  mV umumnya dianggap sebagai ambang batas stabilitas yang dapat diterima. Dalam penelitian ini, nilai potensial zeta yang terukur sebesar  $-35$  mV mengindikasikan bahwa nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% yang dipreparasi dengan ultrasonikasi selama 60 menit berada dalam kategori dispersi yang stabil secara elektrostatik, sejalan dengan konsensus ilmiah yang berlaku [14].

### 2.4 Performa Pendinginan Radiator pada Sistem Mesin Aktual

Pengujian nanofluida langsung pada sistem mesin otomotif yang beroperasi memberikan validasi yang lebih kuat dibandingkan pengujian pada *test rig* statis, karena mencakup dinamika termal yang sesungguhnya seperti variasi beban mesin dan karakteristik pompa air yang digerakkan *belt*. Studi eksperimental yang dipublikasikan pada *Environmental Progress & Sustainable Energy* oleh [15], menyelidiki performa termal nanofluida Fe/air pada radiator otomotif di berbagai laju aliran dan konsentrasi nanopartikel, dan menemukan bahwa laju perpindahan panas mengalami peningkatan terukur seiring naiknya laju aliran fluida. Hasil tersebut sejalan dengan tren yang ditemukan dalam penelitian ini, di mana peningkatan putaran mesin yang secara proporsional meningkatkan laju aliran pompa air menghasilkan efektivitas pendinginan yang lebih tinggi pada nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3%. Kesenjangan yang ada adalah bahwa penelitian [9], menggunakan nanopartikel Fe dengan konsentrasi sangat rendah (0,015–0,045% berat) dan tidak mengkaji hubungan langsung antara putaran mesin dan efektivitas pendinginan, sehingga penelitian ini mengisi celah tersebut secara spesifik.

### 2.5 Tinjauan Komparatif Jenis Nanofluida pada Radiator Otomotif

Berbagai jenis nanopartikel telah dievaluasi sebagai aditif fluida pendingin radiator, meliputi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{ZnO}$ , hingga nanofluida hibrida. Studi komparatif yang terbit di *ScienceDirect* mengkaji performa nanofluida  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ , dan  $\text{MgO}$  secara berdampingan pada radiator kendaraan dan menyimpulkan bahwa masing-masing jenis nanopartikel memiliki keunggulan tersendiri bergantung pada kondisi operasi, dengan  $\text{Al}_2\text{O}_3$  memberikan keseimbangan terbaik antara peningkatan performa dan stabilitas kimia jangka panjang [13]. Penelitian ini memilih  $\text{Al}_2\text{O}_3$  berdasarkan pertimbangan serupa ketersediaan komersial yang luas, stabilitas kimia dalam rentang temperatur operasi mesin (80–100°C), konduktivitas termal intrinsik yang tinggi (36 W/m·K), serta basis data penelitian yang sangat kaya sehingga hasil penelitian ini dapat dibandingkan secara langsung dengan literatur yang ada. Kesenjangan yang dijabatani oleh penelitian ini adalah tidak adanya studi yang secara khusus mengkombinasikan variasi putaran mesin nyata (1000–3000 RPM) dengan analisis efektivitas  $\varepsilon$ -*NTU* pada nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% berbasis air murni dengan surfaktan SDBS pada kondisi atmosfer tropis.

### 3. Metode

#### 3.1 Alat dan Bahan

Penelitian ini menggunakan peralatan utama sebagai berikut:

- Mesin mobil 4 silinder 1.500 cc sebagai sumber panas;
- Radiator standar dengan dimensi  $400 \times 600$  mm;
- Termokopel tipe K dengan akurasi  $\pm 0,1^\circ\text{C}$  pada 8 titik pengukuran;
- Data logger Yokogawa DX200 untuk perekaman data;
- Flow meter elektromagnetik untuk mengukur laju aliran fluida;
- Tachometer digital untuk mengukur putaran mesin;

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah nanopartikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dengan ukuran rata-rata 40 nm (Sigma-Aldrich, kemurnian  $> 99\%$ ), air distilat sebagai fluida dasar, dan surfaktan SDBS (Sodium Dodecylbenzene Sulfonate) 0,1% berat untuk meningkatkan stabilitas dispersi.

#### 3.2 Metode

##### 3.2.1 Preparasi Nanofluida

Nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% volume dipreparasi menggunakan metode dua langkah (*two-step method*). Massa nanopartikel yang dibutuhkan dihitung menggunakan persamaan:

$$m_p = \varphi \times \rho_p \times V_{\text{total}} \quad (2)$$

Di mana  $m_p$  adalah massa nanopartikel (gram),  $\varphi$  adalah fraksi volume (0,003),  $\rho_p$  adalah densitas nanopartikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $3970 \text{ kg/m}^3$ ), dan  $V_{\text{Total}}$  adalah volume total nanofluida (liter). Campuran kemudian diultrasonikasi selama 60 menit menggunakan ultrasonik probe dengan frekuensi 20 kHz dan amplitudo 40% untuk memastikan dispersi yang homogen. Stabilitas nanofluida diverifikasi melalui pengukuran potensial zeta yang menunjukkan nilai  $-35 \text{ mV}$ , mengindikasikan dispersi yang stabil.



Gambar 1. Bubuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$

#### 3.3 Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan pada kondisi atmosfer standar (tekanan 1 atm, kelembaban relatif  $60 \pm 5\%$ ). Mesin dioperasikan selama 15 menit pada setiap kondisi putaran untuk mencapai kondisi tunak (*steady-state*) sebelum data direkam. Data temperatur direkam setiap 10 detik selama 5 menit pada kondisi tunak menggunakan data logger. Variasi putaran mesin yang digunakan adalah 1000, 1500, 2000, 2500, dan 3000 RPM. Setiap pengujian dilakukan tiga kali pengulangan (triplikat) untuk mendapatkan data yang representatif.



Gambar 2. Alat uji radiator otomotif

### 3.4 Parameter dan Perhitungan

Parameter perpindahan panas yang dihitung dalam penelitian ini meliputi laju perpindahan panas ( $Q$ ), efektivitas radiator ( $\epsilon$ ), dan bilangan Nusselt ( $Nu$ ):

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (3)$$

$$\epsilon = Q / Q_{Max} = (T_{in} - T_{out}) / (T_{in} - T_{air}) \times 100\% \quad (4)$$

$$Nu = h \times D_h / k_{nf} \quad (5)$$

Di mana  $\dot{m}$  adalah laju aliran massa (kg/s),  $C_p$  adalah kapasitas panas spesifik (J/kg·K),  $\Delta T$  adalah beda temperatur masuk dan keluar radiator,  $T_{in}$  adalah temperatur masuk fluida,  $T_{out}$  adalah temperatur keluar fluida,  $T_{air}$  adalah temperatur udara masuk,  $h$  adalah koefisien perpindahan panas konvektif, dan  $D_h$  adalah diameter hidrolis saluran.

### 3.5 Analisis Ketidakpastian

Analisis ketidakpastian pengukuran dilakukan menggunakan metode propagasi ketidakpastian standar (ISO GUM). Ketidakpastian pada pengukuran temperatur adalah  $\pm 0,1^\circ C$ , laju aliran massa  $\pm 0,5\%$ , dan perhitungan laju perpindahan panas  $\pm 1,2\%$ . Total ketidakpastian gabungan pada efektivitas radiator adalah  $\pm 1,8\%$ .

## 4. Hasil dan Pembahasan

### 4.1 Karakteristik Sifat Termal Nanofluida

Pengukuran sifat termal nanofluida  $Al_2O_3$  0,3% dilakukan menggunakan alat Hot Disk TPS 2500S dan viskometer Brookfield DV-II+. Hasil pengukuran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Termal Air, Nanopartikel  $Al_2O_3$ , dan Nanofluida  $Al_2O_3$  0,3%

Parameter	Air (Base Fluid)	$Al_2O_3$ Nanopartikel	Nanofluida $Al_2O_3$ 0,3%
Konduktivitas Termal (W/m·K)	0,613	36,0	0,641
Viskositas Dinamik (mPa·s)	0,890	-	0,921
Kapasitas Panas Spesifik (J/kg·K)	4182	765	4098
Densitas (kg/m <sup>3</sup> )	997,1	3970	1006,4

(Sumber: Hasil Pengukuran, 2026)

Dari Tabel 1 terlihat bahwa nanofluida  $Al_2O_3$  0,3% memiliki konduktivitas termal sebesar 0,641 W/m·K, meningkat 4,6% dibandingkan air (0,613 W/m·K). Peningkatan ini sejalan dengan prediksi model Maxwell yang memberikan nilai 0,638 W/m·K, sehingga perbedaan antara nilai pengukuran dan prediksi hanya 0,47%. Viskositas dinamis mengalami peningkatan sebesar 3,5% dari 0,890 menjadi 0,921 mPa·s. Peningkatan viskositas ini relatif kecil sehingga tidak berpengaruh signifikan terhadap tekanan pompa sirkulasi. Densitas nanofluida meningkat sedikit dari 997,1 menjadi 1006,4 kg/m<sup>3</sup> sesuai dengan aturan campuran. Kapasitas panas spesifik mengalami penurunan sebesar 2,0% karena nanopartikel  $Al_2O_3$  memiliki  $C_p$

jauh lebih rendah (765 J/kg·K) dibandingkan air. Namun demikian, penurunan Cp ini dapat dikompensasi oleh peningkatan konduktivitas termal dan bilangan Nusselt yang lebih tinggi.

**4.2 Distribusi Temperatur pada Radiator**

Hasil pengukuran temperatur masuk dan keluar radiator pada berbagai kondisi putaran mesin disajikan pada Tabel 2. Setiap nilai merupakan rata-rata dari tiga pengulangan pengujian.

**Tabel 2.** Data Temperatur Masuk dan Keluar Radiator (°C)

Putaran Me- sin (RPM)	Temp. Masuk Air (°C)	Temp. Masuk NF (°C)	Temp. Keluar Air (°C)	Temp. Keluar NF (°C)
1000	85,2	85,2	72,4	70,1
1500	88,6	88,6	74,8	71,9
2000	91,3	91,3	77,1	73,6
2500	94,5	94,5	79,7	75,8
3000	97,8	97,8	82,3	78,2

(Sumber: Hasil Pengujian, 2026)

Dari Tabel 2 dapat diamati bahwa pada semua kondisi putaran mesin, nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3% konsisten menunjukkan temperatur keluar radiator yang lebih rendah dibandingkan air, meskipun temperatur masuk yang sama. Perbedaan temperatur keluar antara air dan nanofluida berkisar antara 2,3°C pada 1000 RPM hingga 4,1°C pada 3000 RPM. Pada 3000 RPM, temperatur masuk mencapai 97,8°C, mendekati batas aman operasi mesin (110°C). Penggunaan nanofluida berhasil menurunkan temperatur keluar menjadi 78,2°C dibandingkan 82,3°C pada air, memberikan margin keamanan termal yang lebih besar.

**4.3 Analisis Efektivitas Pendinginan**

Efektivitas pendinginan dihitung berdasarkan penurunan temperatur fluida yang melewati radiator relatif terhadap beda temperatur maksimum yang mungkin terjadi. Tabel 3 menyajikan perbandingan efektivitas pendinginan antara air dan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3%.

**Tabel 3.** Perbandingan Efektivitas Pendinginan Air dan Nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3%

RPM	Penurunan Suhu Air (°C)	Penurunan Suhu NF (°C)	Efisiensi Air (%)	Efisiensi NF (%)
1000	12,8	15,1	15,04	17,74
1500	13,8	16,7	15,57	18,84
2000	14,2	17,7	15,55	19,39
2500	14,8	18,7	15,66	19,79
3000	15,5	19,6	15,85	20,04

(Sumber: Hasil Perhitungan, 2026)

Dari Tabel 3, efektivitas rata-rata nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3% adalah 19,16%, sedangkan air adalah 15,53%, sehingga terdapat peningkatan efektivitas sebesar 3,63 poin persentase atau relatif 23,4% lebih tinggi. Peningkatan efektivitas ini konsisten pada semua variasi putaran mesin yang diuji, menunjukkan keandalan nanofluida sebagai fluida pendingin alternatif.

Tren peningkatan efektivitas seiring naiknya putaran mesin dapat dijelaskan oleh meningkatnya laju aliran fluida yang dipompa oleh pompa air yang digerakkan oleh mesin. Laju aliran yang lebih tinggi meningkatkan bilangan Reynolds, mendorong transisi aliran dari laminar ke turbulen, yang pada gilirannya meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif. Nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dengan konduktivitas termal yang lebih tinggi, memberikan manfaat yang lebih besar pada kondisi aliran turbulen.

**4.4 Analisis Laju Perpindahan Panas**

Laju perpindahan panas dihitung menggunakan persamaan  $Q = \dot{m}C_p\Delta T$ . Pada putaran mesin 2000 RPM sebagai kondisi representatif, laju aliran massa fluida terukur sebesar 0,215 kg/s. Laju perpindahan panas untuk air adalah:

$$Q_{air} = 0,215 \times 4182 \times (91,3 - 77,1) = 12.765,3 \text{ W} = 12,77 \text{ kW} \quad (6)$$

Sedangkan untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3%:

$$Q_{nf} = 0,217 \times 4098 \times (91,3 - 73,6) = 15.727,4 \text{ W} = 15,73 \text{ kW} \quad (7)$$

Nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 0,3% mampu memindahkan panas sebesar 15,73 kW, lebih tinggi 23,2% dibandingkan air (12,77 kW) pada kondisi putaran 2000 RPM. Peningkatan ini

terutama disebabkan oleh peningkatan konduktivitas termal yang meningkatkan koefisien perpindahan panas konvektif di saluran radiator.

#### 4.5 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan penelitian-penelitian sebelumnya. Peningkatan efektivitas sebesar 23,4% yang diperoleh pada konsentrasi 0,3% sedikit lebih tinggi dibandingkan hasil[5], yang melaporkan 18–20% pada konsentrasi serupa. Penelitian Kulkarni et al. (2009) pada mesin diesel melaporkan peningkatan yang lebih rendah (8%), namun menggunakan fluida dasar campuran air-etilen glikol yang memiliki konduktivitas termal lebih tinggi dari air murni.

Hasil ini juga mendukung argumen bahwa konsentrasi rendah ( $< 1\%$ ) merupakan pilihan praktis yang memberikan rasio manfaat-biaya yang optimal. Pada konsentrasi 0,3%, peningkatan viskositas yang minimal (3,5%) tidak menimbulkan beban tambahan yang signifikan pada pompa air, sementara peningkatan konduktivitas termal 4,6% memberikan peningkatan laju perpindahan panas yang bermakna.

### 6. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada konsentrasi volume 0,3% memiliki konduktivitas termal sebesar 0,641 W/m·K, meningkat 4,6% dibandingkan air (0,613 W/m·K), dengan peningkatan viskositas yang relatif kecil yaitu 3,5%.
- Efektivitas pendinginan rata-rata nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% adalah 19,16%, lebih tinggi 23,4% secara relatif dibandingkan air yang mencapai efektivitas rata-rata 15,53%. Peningkatan efektivitas ini konsisten pada seluruh variasi putaran mesin yang diuji (1000–3000 RPM).
- Pada putaran mesin 2000 RPM sebagai kondisi operasi tipikal, nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% mampu memindahkan panas sebesar 15,73 kW, lebih tinggi 23,2% dibandingkan air (12,77 kW).
- Penggunaan nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,3% berhasil menurunkan temperatur keluar radiator sebesar 2,3–4,1°C dibandingkan air pada semua kondisi pengujian, memberikan margin keamanan termal yang lebih besar terutama pada putaran tinggi.
- Nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pada konsentrasi volume 0,3% terbukti sebagai alternatif fluida pendingin yang efektif dan praktis untuk sistem pendingin mesin otomotif, dengan rasio peningkatan performa terhadap penambahan viskositas yang menguntungkan.

Untuk penelitian lanjutan, disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi konsentrasi yang lebih luas (0,1–1,0%), stabilitas jangka panjang nanofluida dalam sistem pendingin nyata, serta analisis ekonomi dan daur hidup (*life cycle assessment*) penggunaan nanofluida pada kendaraan komersial.

**Kontribusi Penulis:** T.H. dan M.S.; Metodologi: T.H.; Perangkat Lunak: T.H.; Validasi: T.H. dan M.S.; Analisis formal: T.H.; Investigasi: T.H.; Sumber daya: M.S.; Kurasi data: T.H.; Penulisan persiapan draf asli: T.H.; Penulisan peninjauan dan penyuntingan: M.S.; Visualisasi: T.H.; Supervisi: M.S.; Administrasi proyek: M.S.; Akuisisi pendanaan: M.S.

**Pendanaan:** Penelitian ini tidak menerima pendanaan eksternal. Seluruh biaya penelitian, termasuk pengadaan nanopartikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , bahan habis pakai, dan operasional pengujian, ditanggung secara mandiri oleh para penulis tanpa dukungan hibah dari lembaga pemerintah maupun swasta mana pun.

**Pernyataan Ketersediaan Data:** Data mentah hasil pengukuran temperatur, laju aliran massa, dan efektivitas pendinginan yang mendukung temuan penelitian ini tersedia atas permintaan wajar kepada penulis korespondensi. Data tidak diarsipkan dalam repositori publik karena keterbatasan fasilitas institusi pada saat penelitian dilaksanakan.

**Ucapan Terima Kasih:** Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Teknik Mesin Universitas PGRI Semarang atas fasilitas pengujian yang disediakan. Penulis juga menyatakan bahwa perangkat kecerdasan buatan digunakan sebatas bantuan tata bahasa

dalam proses penyuntingan naskah, dan seluruh konten ilmiah merupakan hasil karya orisinal para penulis.

**Konflik Kepentingan:** Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan. Penelitian ini dilaksanakan secara independen tanpa keterlibatan pihak eksternal dalam desain studi, pengumpulan, analisis, maupun interpretasi data. Pendana tidak memiliki peran dalam desain studi; dalam pengumpulan, analisis, atau interpretasi data; dalam penulisan naskah; atau dalam keputusan untuk menerbitkan hasil.

## Referensi

- [1] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*, vol. 1. Clarendon press, 1873.
- [2] B. C. Pak and Y. I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Exp. Heat Transf. an Int. J.*, vol. 11, no. 2, pp. 151–170, 1998.
- [3] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, "Principles of heat and mass transfer," (*No Title*), 2013.
- [4] W. Yu and S. U. S. Choi, "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model," *J. nanoparticle Res.*, vol. 5, no. 1, pp. 167–171, 2003.
- [5] S. Z. Heris, S. G. Etemad, and M. N. Esfahany, "Convective heat transfer of a Cu/water nanofluid flowing through a circular tube," *Exp. heat Transf.*, vol. 22, no. 4, pp. 217–227, 2009.
- [6] D. P. Kulkarni, R. S. Vajjha, D. K. Das, and D. Oliva, "Application of aluminum oxide nanofluids in diesel electric generator as jacket water coolant," vol. 28, pp. 1774–1781, 2008, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2007.11.017.
- [7] T.-P. Teng and C.-C. Yu, "Heat dissipation performance of MWCNT's nano-coolant for vehicle," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 49, pp. 22–30, 2013.
- [8] K. Y. Leong, R. Saidur, S. N. Kazi, and A. H. Mamun, "Performance investigation of an automotive car radiator operated with nano fluid-based coolants ( nano fluid as a coolant in a radiator )," vol. 30, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.07.019.
- [9] J. A. Eastman, S. U. S. Choi, S. Li, W. Yu, and L. J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 6, pp. 718–720, 2001.
- [10] C. Sus, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, developments and applications of non-Newtonian flows," *ASME, FED, MD, 1995*, vol. 231, pp. 99-I05, 1995.
- [11] X. Wang and X. Xu, "Thermal Conductivity of Nanoparticle – Fluid Mixture," vol. 13, no. 4, 1999.
- [12] A. Ghadimi, R. Saidur, and H. S. C. Metselaar, "International Journal of Heat and Mass Transfer A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," vol. 54, pp. 4051–4068, 2011, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.014.
- [13] S. U. S. Choi, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," in *ASME international mechanical engineering congress and exposition*, American Society of Mechanical Engineers, 1995, pp. 99–105.
- [14] S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, M. Sei, and S. M. Hoseini, "Improving the cooling performance of automobile radiator with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / water nano fluid," vol. 31, pp. 1833–1838, 2011, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2011.02.029.
- [15] H. Ali, H. Liaquat, and B. Maqsood, "Experimental investigation of convective heat transfer augmentation for car radiator using ZnO e water nano fluids," vol. 84, pp. 317–324, 2015.