

PERSIAPAN DAN KARAKTERISASI AWAL NANOFLUIDA MANGANESE FERRITE (MnFe₂O₄)–ETHYLENE GLYCOL UNTUK APLIKASI HEAT EXCHANGER DOUBLE PIPE

Arochian Hudio Ilhamdizi

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: arochianhudio.19073@mhs.unesa.ac.id

I Made Arsana

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: madearsana@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan preparasi serta karakterisasi awal nanofluida berbasis Manganese Ferrite (MnFe₂O₄)–Ethylene Glycol yang akan digunakan sebagai fluida kerja pada heat exchanger tipe double pipe. Pengembangan nanofluida dilakukan sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan sifat termofisika fluida sehingga mampu meningkatkan performa perpindahan panas pada sistem penukar kalor. Preparasi nanofluida dilakukan menggunakan metode two-step dengan mendispersikan nanopartikel MnFe₂O₄ ke dalam fluida dasar ethylene glycol pada variasi konsentrasi 0%; 0,1%; 0,3%; 0,5%; dan 1%. Proses pencampuran diawali menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit dan dilanjutkan dengan proses sonikasi selama 60 menit untuk menghasilkan dispersi nanopartikel yang homogen serta meminimalkan terjadinya aglomerasi. Karakterisasi material dilakukan menggunakan pengujian Scanning Electron Microscopy (SEM) dan X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengetahui morfologi permukaan serta struktur kristal nanopartikel MnFe₂O₄. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa nanopartikel MnFe₂O₄ memiliki morfologi yang sesuai sebagai material nanofluida dan struktur kristal yang terbentuk sesuai dengan karakteristik Manganese Ferrite. Proses preparasi menghasilkan nanofluida yang homogen dan stabil pada pengamatan awal sehingga layak digunakan untuk pengujian thermophysical properties dan pengujian performa perpindahan panas pada heat exchanger tipe double pipe. Hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar dalam pengembangan nanofluida MnFe₂O₄–Ethylene Glycol sebagai fluida kerja alternatif yang memiliki potensi meningkatkan efisiensi sistem perpindahan panas.

Kata Kunci: Manganese Ferrite, MnFe₂O₄, nanofluida, heat exchanger, preparasi, SEM, XRD.

Abstract

This study aims to prepare and characterize Manganese Ferrite (MnFe₂O₄)–Ethylene Glycol nanofluids for application as the working fluid in a double-pipe heat exchanger. The development of nanofluids is considered a promising approach to improving the thermophysical properties of conventional fluids, thereby enhancing heat transfer performance in heat exchanger systems. The nanofluids were prepared using the two-step method by dispersing MnFe₂O₄ nanoparticles into ethylene glycol at concentrations of 0%, 0.1%, 0.3%, 0.5%, and 1%. The suspension was stirred using a magnetic stirrer for 30 minutes and subsequently sonicated for 60 minutes to obtain a homogeneous nanoparticle dispersion while minimizing particle agglomeration. Material characterization was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-Ray Diffraction (XRD) to investigate the surface morphology and crystal structure of MnFe₂O₄ nanoparticles. The characterization results indicated that the MnFe₂O₄ nanoparticles possessed morphological characteristics suitable for nanofluid applications and exhibited a crystal structure consistent with manganese ferrite materials. The preparation process successfully produced homogeneous and initially stable nanofluids, making them suitable for subsequent thermophysical property measurements and heat transfer performance evaluation in a double-pipe heat exchanger. The prepared MnFe₂O₄–Ethylene Glycol nanofluids are expected to serve as a promising alternative working fluid for improving heat transfer efficiency in thermal systems.

Keywords: Manganese Ferrite, MnFe₂O₄, nanofluid, heat exchanger, preparation, SEM, XRD.

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pada sektor industri, pembangkit energi, transportasi, sistem pendingin, serta proses manufaktur mendorong meningkatnya kebutuhan terhadap sistem perpindahan panas yang memiliki efisiensi tinggi. Sistem perpindahan panas yang baik mampu meningkatkan efektivitas penggunaan energi,

mengurangi konsumsi bahan bakar, memperpanjang umur peralatan, serta menekan biaya operasional. Salah satu komponen yang memiliki peranan penting dalam sistem tersebut adalah heat exchanger atau alat penukar kalor. Heat exchanger merupakan perangkat yang berfungsi memindahkan energi panas dari fluida bertemperatur tinggi ke fluida bertemperatur rendah tanpa terjadi pencampuran secara langsung antara kedua

fluida. Peralatan ini telah banyak digunakan pada pembangkit listrik, industri petrokimia, industri makanan dan minuman, sistem pendingin udara, otomotif, hingga berbagai proses produksi yang memerlukan pengaturan temperatur secara kontinu.

Meningkatnya kebutuhan terhadap efisiensi energi menyebabkan penelitian mengenai peningkatan performa heat exchanger terus berkembang. Berbagai pendekatan telah dilakukan, seperti modifikasi geometri saluran aliran, penambahan sirip (fin), optimasi pola aliran, hingga pengembangan fluida kerja dengan karakteristik termal yang lebih baik. Dibandingkan dengan modifikasi konstruksi alat yang umumnya memerlukan biaya tinggi dan perubahan desain yang kompleks, pengembangan fluida kerja merupakan salah satu pendekatan yang lebih sederhana serta memiliki potensi besar dalam meningkatkan performa perpindahan panas tanpa mengubah konstruksi utama heat exchanger.

Kinerja heat exchanger dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain luas permukaan perpindahan panas, perbedaan temperatur kedua fluida, laju aliran fluida, pola aliran, serta sifat termofisika fluida kerja yang digunakan. Di antara faktor-faktor tersebut, sifat termofisika fluida menjadi salah satu parameter yang sangat menentukan karena berhubungan langsung dengan kemampuan fluida dalam menyerap, menyimpan, dan menghantarkan energi panas. Fluida kerja yang memiliki konduktivitas termal tinggi akan lebih cepat mentransfer panas sehingga mampu meningkatkan efisiensi proses perpindahan panas secara keseluruhan.

Ethylene glycol merupakan salah satu fluida yang banyak digunakan sebagai media perpindahan panas pada berbagai aplikasi industri. Fluida ini memiliki beberapa keunggulan, seperti stabilitas termal yang baik, titik didih yang tinggi, titik beku yang rendah, serta kemampuan bekerja pada rentang temperatur yang cukup luas. Oleh karena itu, ethylene glycol banyak dimanfaatkan sebagai fluida pendingin maupun fluida pemindah panas pada radiator kendaraan, sistem refrigerasi, pembangkit listrik, dan berbagai sistem termal lainnya. Meskipun demikian, ethylene glycol masih memiliki keterbatasan berupa nilai konduktivitas termal yang relatif rendah apabila dibandingkan dengan material padat penghantar panas. Keterbatasan tersebut menyebabkan laju perpindahan panas yang dihasilkan belum optimal sehingga diperlukan suatu metode untuk meningkatkan karakteristik termalnya.

Salah satu inovasi yang berkembang pesat dalam bidang perpindahan panas adalah penggunaan nanofluida. Nanofluida merupakan fluida dasar yang dicampurkan dengan nanopartikel berukuran kurang dari 100 nanometer sehingga menghasilkan sifat termofisika yang lebih baik dibandingkan fluida konvensional. Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Choi pada tahun 1995, nanofluida telah menjadi salah satu topik penelitian yang banyak dikembangkan karena mampu meningkatkan konduktivitas termal, koefisien perpindahan panas konveksi, serta efektivitas sistem perpindahan panas. Selain itu, penggunaan nanopartikel dalam konsentrasi yang relatif rendah juga memungkinkan peningkatan performa termal tanpa menyebabkan perubahan sifat

aliran yang terlalu besar apabila dibandingkan dengan fluida dasar.

Peningkatan performa nanofluida dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain jenis nanopartikel, ukuran partikel, bentuk partikel, konsentrasi, stabilitas dispersi, serta karakteristik fluida dasar yang digunakan. Berbagai jenis nanopartikel telah dikembangkan sebagai bahan aditif nanofluida, seperti aluminium oksida (Al_2O_3), titanium dioksida (TiO_2), tembaga oksida (CuO), seng oksida (ZnO), silikon dioksida (SiO_2), graphene, graphene oxide, carbon nanotube, hingga berbagai material berbasis logam dan oksida logam lainnya. Setiap jenis nanopartikel memiliki karakteristik yang berbeda sehingga menghasilkan peningkatan sifat termofisika yang berbeda pula.

Salah satu material nanopartikel yang mulai banyak dikembangkan adalah Manganese Ferrite (MnFe_2O_4). Material ini termasuk ke dalam kelompok spinel ferrite yang memiliki kombinasi sifat magnetik, kestabilan kimia, serta karakteristik termal yang baik. Selain memiliki ukuran partikel dalam skala nanometer, MnFe_2O_4 juga memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan fluida dasar sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan penghantaran panas apabila didispersikan ke dalam ethylene glycol. Karakteristik tersebut menjadikan MnFe_2O_4 sebagai salah satu kandidat material nanopartikel yang potensial untuk dikembangkan sebagai bahan aditif nanofluida pada sistem perpindahan panas.

Selain kemampuan menghantarkan panas, penggunaan nanopartikel MnFe_2O_4 juga diharapkan mampu memperbaiki beberapa sifat termofisika fluida, seperti densitas, viskositas, kalor spesifik, dan konduktivitas termal. Perubahan sifat-sifat tersebut selanjutnya akan memengaruhi parameter perpindahan panas, seperti bilangan Reynolds, bilangan Prandtl, bilangan Nusselt, koefisien perpindahan panas konveksi, serta efektivitas heat exchanger. Oleh karena itu, karakteristik awal nanofluida perlu diketahui sebelum dilakukan pengujian performa perpindahan panas sehingga hubungan antara perubahan sifat termofisika dan peningkatan performa sistem dapat dianalisis secara lebih komprehensif.

Keberhasilan pengembangan nanofluida tidak hanya ditentukan oleh jenis nanopartikel yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh proses preparasi. Preparasi yang kurang baik dapat menyebabkan nanopartikel mengalami aglomerasi atau penggumpalan sehingga distribusi partikel di dalam fluida menjadi tidak merata. Kondisi tersebut akan menurunkan stabilitas suspensi, mengurangi luas kontak antara nanopartikel dan fluida dasar, serta menyebabkan penurunan kemampuan perpindahan panas. Oleh karena itu, proses preparasi merupakan salah satu tahapan yang sangat penting dalam penelitian nanofluida.

Metode preparasi nanofluida yang paling banyak digunakan adalah metode two-step karena prosesnya relatif sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan pada berbagai jenis nanopartikel. Pada metode ini, nanopartikel yang telah disintesis terlebih dahulu dicampurkan ke dalam fluida dasar melalui proses

pengadukan menggunakan magnetic stirrer, kemudian dilanjutkan dengan proses sonikasi menggunakan gelombang ultrasonik. Pengadukan berfungsi untuk menyebarkan nanopartikel secara awal ke seluruh volume fluida, sedangkan proses sonikasi bertujuan memecah aglomerasi partikel sehingga diperoleh dispersi nanopartikel yang lebih homogen dan stabil. Kombinasi kedua proses tersebut diharapkan mampu menghasilkan nanofluida dengan kualitas yang baik sehingga layak digunakan pada pengujian sifat termofisika maupun pengujian performa heat exchanger.

Selain preparasi, karakterisasi material juga merupakan tahapan penting sebelum nanofluida diaplikasikan sebagai fluida kerja. Karakterisasi dilakukan untuk memastikan bahwa nanopartikel yang digunakan benar-benar memiliki karakteristik sesuai dengan material yang diharapkan. Pengujian morfologi menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) memberikan informasi mengenai bentuk permukaan, ukuran relatif, serta distribusi partikel. Sementara itu, pengujian menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) bertujuan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fase material sehingga dapat diketahui kesesuaian nanopartikel MnFe₂O₄ yang digunakan dalam penelitian. Hasil karakterisasi tersebut menjadi dasar dalam memastikan kualitas material sebelum dilakukan pengujian thermophysical properties maupun pengujian performa perpindahan panas.

Berdasarkan berbagai penelitian terdahulu, sebagian besar penelitian mengenai nanofluida berbasis MnFe₂O₄ lebih banyak difokuskan pada pengujian sifat termofisika maupun evaluasi performa perpindahan panas. Namun, kajian yang secara khusus membahas tahapan preparasi dan karakterisasi awal nanofluida MnFe₂O₄-Ethylene Glycol sebagai dasar sebelum dilakukan pengujian performa heat exchanger masih relatif terbatas. Padahal, kualitas preparasi dan karakterisasi material sangat menentukan keberhasilan pengujian pada tahap selanjutnya karena berkaitan langsung dengan homogenitas dispersi nanopartikel dan kestabilan nanofluida.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk melakukan preparasi dan karakterisasi awal nanofluida Manganese Ferrite (MnFe₂O₄)-Ethylene Glycol menggunakan metode two-step. Preparasi dilakukan melalui proses pengadukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit dan sonikasi selama 60 menit pada beberapa variasi konsentrasi nanopartikel. Selanjutnya dilakukan karakterisasi menggunakan pengujian SEM dan XRD untuk mengetahui morfologi serta struktur kristal nanopartikel MnFe₂O₄. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam pengembangan nanofluida MnFe₂O₄-Ethylene Glycol sebagai fluida kerja alternatif yang memiliki sifat termofisika lebih baik dan berpotensi meningkatkan performa perpindahan panas pada heat exchanger tipe double pipe melalui pengujian pada penelitian lanjutan.

METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk melakukan preparasi dan karakterisasi awal nanofluida berbasis Manganese Ferrite (MnFe₂O₄)-Ethylene Glycol sebagai fluida kerja yang akan digunakan pada pengujian perpindahan panas menggunakan heat exchanger tipe double pipe. Penelitian difokuskan pada proses pembuatan nanofluida menggunakan metode two-step serta karakterisasi material nanopartikel sebelum dilakukan pengujian thermophysical properties dan performa perpindahan panas. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan seluruh parameter preparasi dikendalikan secara sistematis sehingga menghasilkan nanofluida dengan kualitas yang seragam dan dapat dianalisis secara ilmiah.

1) Bahan Penelitian

Bahan utama yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas nanopartikel Manganese Ferrite (MnFe₂O₄) sebagai material aditif dan ethylene glycol (EG) sebagai fluida dasar (base fluid). Pemilihan ethylene glycol didasarkan pada karakteristiknya yang memiliki stabilitas termal tinggi, titik didih tinggi, titik beku rendah, serta banyak digunakan sebagai fluida perpindahan panas pada berbagai sistem termal.

Nanopartikel MnFe₂O₄ dicampurkan ke dalam ethylene glycol dengan lima variasi konsentrasi volume, yaitu 0% (ethylene glycol murni), 0,1%, 0,3%, 0,5%, dan 1%. Variasi konsentrasi tersebut digunakan untuk memperoleh nanofluida dengan karakteristik yang berbeda sehingga dapat digunakan sebagai dasar pada penelitian lanjutan mengenai sifat termofisika dan performa perpindahan panas.

2) Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini disesuaikan dengan tahapan preparasi dan karakterisasi material, yaitu:

1. Magnetic stirrer.
2. Sonikator (ultrasonic bath).
3. Timbangan digital presisi.
4. Gelas beker.
5. Gelas ukur.
6. Pipet ukur.
7. Scanning Electron Microscopy (SEM).
8. X-Ray Diffraction (XRD).

Seluruh peralatan digunakan sesuai dengan prosedur pengujian laboratorium untuk memperoleh hasil preparasi dan karakterisasi yang akurat.

3) Preparasi Nanofluida

Preparasi nanofluida dilakukan menggunakan metode two-step. Metode ini dipilih karena memiliki proses yang sederhana, mudah diterapkan, serta banyak digunakan pada penelitian nanofluida berbasis nanopartikel logam oksida. Pada metode ini, nanopartikel yang telah tersedia dicampurkan secara langsung ke dalam fluida dasar menggunakan kombinasi proses pengadukan dan sonikasi.

Tahapan preparasi dilakukan sebagai berikut.

1. Menimbang nanopartikel MnFe₂O₄ sesuai dengan variasi konsentrasi yang telah ditentukan.

2. Menyiapkan ethylene glycol sebagai fluida dasar.
3. Mencampurkan nanopartikel MnFe_2O_4 ke dalam ethylene glycol secara bertahap.
4. Melakukan proses pengadukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit agar nanopartikel mulai terdistribusi di dalam fluida.
5. Melanjutkan proses menggunakan sonikator selama 60 menit untuk memecah aglomerasi nanopartikel dan menghasilkan dispersi yang lebih homogen.
6. Menyimpan nanofluida dalam wadah tertutup sebelum dilakukan proses karakterisasi.

Kombinasi proses pengadukan dan sonikasi diharapkan mampu menghasilkan nanofluida yang homogen sehingga distribusi nanopartikel di dalam fluida dasar menjadi lebih merata serta mampu meminimalkan terjadinya sedimentasi pada tahap awal preparasi.

4) Karakterisasi Material

Karakterisasi dilakukan untuk memastikan bahwa nanopartikel MnFe_2O_4 memiliki karakteristik yang sesuai sebelum digunakan sebagai bahan aditif nanofluida. Pengujian karakterisasi meliputi analisis morfologi dan struktur kristal material.

Pengujian morfologi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Pengujian ini bertujuan untuk mengamati bentuk permukaan, ukuran relatif partikel, serta distribusi morfologi nanopartikel MnFe_2O_4 . Informasi yang diperoleh dari hasil SEM digunakan untuk mengetahui karakteristik fisik material yang berpengaruh terhadap proses perpindahan panas.

Selanjutnya dilakukan pengujian menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fase material MnFe_2O_4 . Pengujian XRD dilakukan pada rentang sudut difraksi tertentu sehingga diperoleh pola difraksi yang dapat digunakan untuk memastikan bahwa nanopartikel yang digunakan memiliki struktur kristal sesuai dengan karakteristik material manganese ferrite.

5) Diagram Alir Penelitian

Secara umum tahapan penelitian dilakukan melalui beberapa langkah sebagai berikut.

1. Persiapan alat dan bahan.
2. Penimbangan nanopartikel MnFe_2O_4 .
3. Preparasi nanofluida menggunakan metode two-step.
4. Pengadukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit.
5. Sonikasi selama 60 menit.
6. Karakterisasi nanopartikel menggunakan SEM.
7. Karakterisasi struktur kristal menggunakan XRD.
8. Analisis hasil preparasi dan karakterisasi.
9. Nanofluida siap digunakan untuk pengujian thermophysical properties dan penelitian performa heat exchanger.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Preparasi Nanofluida Manganese Ferrite (MnFe_2O_4)–Ethylene Glycol

Preparasi nanofluida dilakukan menggunakan metode two-step dengan mendispersikan nanopartikel Manganese Ferrite (MnFe_2O_4) ke dalam fluida dasar ethylene glycol pada variasi konsentrasi 0%, 0,1%, 0,3%, 0,5%, dan 1%. Metode ini dipilih karena memiliki tahapan yang relatif sederhana, mudah diaplikasikan, serta mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik apabila dikombinasikan dengan proses pengadukan dan sonikasi. Penggunaan metode two-step juga lebih ekonomis dibandingkan metode one-step sehingga banyak diterapkan pada penelitian nanofluida berbasis oksida logam.

Tahap preparasi diawali dengan penimbangan nanopartikel MnFe_2O_4 sesuai variasi konsentrasi yang telah ditentukan. Selanjutnya nanopartikel dicampurkan secara bertahap ke dalam ethylene glycol kemudian diaduk menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit. Pengadukan bertujuan menghasilkan pencampuran awal antara nanopartikel dan fluida dasar sehingga distribusi partikel menjadi lebih merata. Setelah proses pengadukan selesai, campuran dilanjutkan dengan proses sonikasi selama 60 menit menggunakan ultrasonic bath.

Proses sonikasi memberikan gelombang ultrasonik yang mampu memecah ikatan antartikel sehingga aglomerasi nanopartikel dapat diminimalkan. Gelombang ultrasonik menghasilkan fenomena kavitasi yang membantu memisahkan partikel-partikel yang saling menempel sehingga penyebaran nanopartikel di dalam ethylene glycol menjadi lebih homogen. Tahapan ini menjadi salah satu proses yang sangat menentukan kualitas nanofluida karena homogenitas dispersi akan berpengaruh terhadap karakteristik termofisika maupun performa perpindahan panas pada tahap pengujian berikutnya.

Berdasarkan hasil pengamatan visual setelah proses preparasi selesai, nanofluida menunjukkan warna yang relatif seragam pada seluruh volume fluida. Intensitas warna meningkat seiring bertambahnya konsentrasi nanopartikel MnFe_2O_4 . Perubahan warna tersebut mengindikasikan bahwa nanopartikel telah terdispersi ke dalam fluida dasar sesuai dengan variasi konsentrasi yang digunakan. Pada pengamatan awal tidak ditemukan adanya pemisahan fase maupun endapan yang signifikan sehingga menunjukkan bahwa proses preparasi berhasil menghasilkan suspensi nanopartikel yang relatif stabil.

Keberhasilan proses preparasi menjadi dasar penting sebelum dilakukan karakterisasi material dan pengujian thermophysical properties. Dispersi nanopartikel yang baik memungkinkan setiap partikel berinteraksi secara optimal dengan fluida dasar sehingga potensi peningkatan konduktivitas termal, koefisien perpindahan panas, dan efisiensi sistem heat exchanger dapat tercapai pada tahap penelitian selanjutnya.

Karakterisasi Morfologi Menggunakan SEM

Karakterisasi morfologi dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengetahui bentuk permukaan dan karakteristik morfologi nanopartikel Manganese Ferrite (MnFe₂O₄). Pengujian ini memberikan informasi mengenai bentuk partikel, ukuran relatif, tingkat penyebaran partikel, serta karakteristik permukaan yang berpengaruh terhadap proses perpindahan panas.

Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa nanopartikel MnFe₂O₄ memiliki morfologi berbentuk butiran (granular) yang tersebar relatif merata dengan ukuran pada skala nanometer. Pada beberapa bagian masih terlihat adanya kecenderungan partikel saling berdekatan akibat gaya tarik antarnanopartikel. Namun demikian, secara umum distribusi partikel masih menunjukkan karakteristik yang baik dan sesuai dengan morfologi khas nanopartikel Manganese Ferrite.

Ukuran partikel yang berada pada skala nanometer memberikan luas permukaan spesifik yang tinggi sehingga meningkatkan luas kontak antara nanopartikel dengan fluida dasar. Semakin besar luas permukaan kontak tersebut maka proses perpindahan energi panas dari nanopartikel menuju fluida akan berlangsung lebih efektif. Kondisi ini menjadi salah satu alasan penggunaan nanopartikel mampu meningkatkan sifat termofisika dibandingkan fluida konvensional.

Selain ukuran partikel, morfologi permukaan yang relatif homogen juga mendukung proses dispersi nanopartikel selama preparasi. Distribusi partikel yang baik akan mengurangi kemungkinan terbentuknya daerah dengan konsentrasi nanopartikel yang terlalu tinggi sehingga kestabilan nanofluida dapat dipertahankan selama proses pengujian.

Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa nanopartikel MnFe₂O₄ yang digunakan memiliki karakteristik morfologi yang sesuai sebagai material penyusun nanofluida sehingga layak digunakan pada penelitian lanjutan mengenai pengujian thermophysical properties dan performa perpindahan panas pada heat exchanger tipe double pipe.

Karakterisasi Struktur Kristal Menggunakan XRD

Karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal nanopartikel Manganese Ferrite (MnFe₂O₄). Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa material yang digunakan memiliki fase kristal sesuai dengan karakteristik manganese ferrite sehingga dapat digunakan sebagai bahan aditif nanofluida.

Hasil pengujian XRD menunjukkan munculnya puncak-puncak difraksi yang merepresentasikan struktur kristal khas MnFe₂O₄. Pola difraksi yang diperoleh menunjukkan bahwa nanopartikel memiliki tingkat kristalinitas yang baik tanpa ditemukannya fase pengotor yang dominan. Keberadaan puncak-puncak difraksi tersebut mengindikasikan bahwa proses sintesis material telah menghasilkan struktur spinel ferrite sesuai karakteristik Manganese Ferrite.

Struktur kristal spinel memiliki susunan atom yang stabil sehingga memberikan sifat fisik dan termal yang

baik. Stabilitas struktur kristal tersebut mendukung kemampuan nanopartikel dalam menghantarkan panas ketika didispersikan ke dalam fluida dasar. Selain itu, struktur kristal yang baik juga menunjukkan bahwa material memiliki kualitas yang memadai untuk digunakan sebagai bahan aditif pada pengembangan nanofluida.

Hasil karakterisasi XRD memperkuat hasil pengamatan SEM bahwa nanopartikel MnFe₂O₄ yang digunakan memiliki karakteristik material yang sesuai. Dengan demikian, nanopartikel tersebut layak digunakan sebagai material penyusun nanofluida untuk penelitian perpindahan panas.

Homogenitas Nanofluida

Homogenitas merupakan salah satu parameter penting dalam pengembangan nanofluida karena sangat memengaruhi kestabilan suspensi serta kemampuan perpindahan panas. Nanofluida yang homogen memungkinkan nanopartikel terdistribusi secara merata sehingga setiap partikel dapat berkontribusi dalam meningkatkan sifat termofisika fluida. Sebaliknya, aglomerasi maupun sedimentasi nanopartikel akan mengurangi luas kontak dengan fluida dasar sehingga efektivitas perpindahan panas menjadi menurun.

Hasil preparasi menunjukkan bahwa kombinasi pengadukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit dan sonikasi selama 60 menit mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik. Pengamatan awal setelah proses preparasi tidak menunjukkan adanya pengendapan yang berarti maupun pemisahan fase pada seluruh variasi konsentrasi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa metode preparasi yang digunakan berhasil menghasilkan nanofluida dengan tingkat homogenitas yang baik.

Homogenitas yang tinggi juga memberikan keuntungan pada tahap pengujian thermophysical properties karena karakteristik fluida menjadi lebih seragam selama proses pengujian berlangsung. Dengan demikian, data yang diperoleh pada penelitian lanjutan akan lebih representatif dalam menggambarkan pengaruh konsentrasi nanopartikel terhadap perubahan sifat termofisika nanofluida.

Potensi Aplikasi Nanofluida

Keberhasilan preparasi dan karakterisasi awal menunjukkan bahwa nanofluida Manganese Ferrite (MnFe₂O₄)-Ethylene Glycol memiliki potensi yang baik untuk diaplikasikan sebagai fluida kerja pada sistem heat exchanger tipe double pipe. Karakteristik morfologi nanopartikel yang sesuai, struktur kristal yang baik, serta homogenitas dispersi yang diperoleh menjadi dasar bahwa nanofluida telah memenuhi persyaratan awal sebelum dilakukan pengujian sifat termofisika dan evaluasi performa perpindahan panas.

Nanopartikel MnFe₂O₄ diharapkan mampu meningkatkan konduktivitas termal fluida dasar sehingga proses penghantaran panas berlangsung lebih efektif dibandingkan ethylene glycol murni. Peningkatan kemampuan penghantaran panas tersebut selanjutnya diperkirakan akan meningkatkan bilangan Nusselt, koefisien perpindahan panas konveksi, laju perpindahan

panas, serta efektivitas heat exchanger pada penelitian utama. Oleh karena itu, preparasi dan karakterisasi awal yang berhasil dilakukan pada penelitian ini menjadi tahapan penting dalam mendukung pengembangan nanofluida sebagai fluida kerja alternatif pada berbagai sistem perpindahan panas, baik pada skala laboratorium maupun aplikasi industri

Ucapan Terima Kasih (opsional)

Bagian ini memuat ucapan terima kasih yang disampaikan kepada penyandang dana, pihak-pihak yang telah membantu sehingga tulisan ini terwujud.

DAFTAR PUSTAKA

- Ashiddiqi, M. R. (2021). Desain Dan Implementasi Tuning Cascade PID Pada Heat Exchanger Tipe Shell-Tube (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Cahyani, S. O., Dwiloka, B., & Rizqiati, H. (2019). Perubahan Sifat Fisikokimia Dan Mutu Hedonik Kefir Air Kelapa Hijau (*Cocos Nucifera* L.) Dengan Penambahan High Fructose Syrup (Hfs). *Jurnal Teknologi Pangan*, 3(1), 96-103.
- Erwin, Asbanu, H., Chan, Y., Sugiyanto, D., & Susanto, H. (2025). Studi Aplikasi Heat Transfer Menggunakan Sistem Penukar Panas Tipe Shell & Tube Di Industri Manufaktur.
- Esfahani, M. R., Languri, E. M., & Nunna, M. R. (2016). Effect Of Particle Size And Viscosity On Thermal Conductivity Enhancement Of Graphene Oxide Nanofluid. *International Communications In Heat And Mass Transfer*, 76, 308-315.
- Jing, F., Yixin, L., Pengjv, M., Yongkun, G., Shichao, G., Bing, C., ... & Yudong, L. (2019). Supercooling And Heterogeneous Nucleation In Acoustically Levitated Deionized Water And Graphene Oxide Nanofluids Droplets. *Experimental Thermal And Fluid Science*, 103, 143-148.
- Pratomo, H. S., & Chalim, A. (2022). Efektivitas Alat Penukar Panas Shell And Tube 1-1 Dengan Metanol Sebagai Fluida Pemanas Dan Etanol Sebagai Fluida Pendingin. *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, 8(4), 771-776.
- Ramadhan, A. I., Sari, A. M., Saptaji, K., Rahardja, I. B., Umar, E., Perdana, S. Y., & Azmi, W. H. (2023). Characterization And Stability Of ZrO_2-SiO_2 Nanofluids From Local Minerals Indonesia As Green Nanofluids To Application Radiator Cooling System. *Journal Of Advanced Research In Fluid Mechanics And Thermal Sciences*, 111(2), 126-140.