PERSIAPAN DAN KARAKTERISASI AWAL NANOFLUIDA GRAPHENE OXIDE–ETHYLENE GLYCOL UNTUK APLIKASI HEAT EXCHANGER DOUBLE PIPE

Agus Feri Kristanto
S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik,Universitas Negeri Surabaya
Email: agusferi.19071@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 graphene oxide–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 berpotensi meningkatkan performa perpindahan panas pada sistem penukar kalor. Proses preparasi dilakukan melalui metode two-step dengan mencampurkan nanopartikel graphene oxide ke dalam fluida dasar ethylene glycol pada variasi konsentrasi 0%, 0,004%, 0,005%, dan 0,006%. Proses pencampuran dilakukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit dan dilanjutkan dengan proses sonikasi selama 1 jam untuk memperoleh dispersi nanopartikel yang homogen serta meminimalkan terjadinya aglomerasi partikel. Karakterisasi material graphene oxide dilakukan menggunakan pengujian SEM-EDX dan XRD untuk mengetahui morfologi permukaan, kandungan unsur kimia, dan struktur kristalnya. Hasil pengujian SEM-EDX menunjukkan bahwa graphene oxide memiliki kandungan karbon sebesar 55,80% dan oksigen sebesar 37,19% yang merupakan karakteristik utama material graphene oxide. Sementara itu, hasil pengujian XRD menunjukkan puncak difraksi utama pada sudut 2θ sekitar 10,32° yang mengindikasikan keberadaan struktur kristal graphene oxide serta menunjukkan bahwa material telah mengalami proses oksidasi dengan baik. Proses preparasi yang dilakukan berhasil menghasilkan nanofluida yang homogen dan stabil pada pengamatan awal, sehingga layak digunakan untuk pengujian thermophysical properties serta aplikasi pada sistem heat exchanger sebagai fluida kerja alternatif yang berpotensi meningkatkan kinerja perpindahan panas.

Kata Kunci: graphene oxide, nanofluida, heat exchanger, preparasi, SEM-EDX, XRD

Abstract

This study aims to prepare and characterize graphene oxide–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 graphene oxide nanoparticles into ethylene glycol at concentrations of 0%, 0.004%, 0.005%, and 0.006%. The mixture was stirred using a magnetic stirrer for 30 minutes, followed by ultrasonic treatment for 1 hour to obtain a homogeneous nanoparticle dispersion and minimize particle agglomeration. The graphene oxide material was characterized using Scanning Electron Microscopy–Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDX) and X-ray Diffraction (XRD) to investigate its surface morphology, elemental composition, and crystal structure. The SEM-EDX results showed that the graphene oxide contained 55.80 wt% carbon and 37.19 wt% oxygen, confirming the typical elemental composition of graphene oxide. Meanwhile, the XRD analysis revealed a dominant diffraction peak at approximately 2θ = 10.32°, indicating the characteristic crystal structure of graphene oxide and confirming the successful oxidation of the material. The preparation process successfully produced homogeneous and initially stable nanofluids, making them suitable for subsequent thermophysical property measurements and application in heat exchanger systems as an alternative working fluid with the potential to enhance heat transfer performance.

Keywords: *graphene oxide, nanofluid, preparation, SEM-EDX, XRD.*

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di bidang industri, energi, transportasi, dan sistem pendingin menyebabkan kebutuhan terhadap sistem perpindahan panas yang efisien semakin meningkat. Peningkatan kebutuhan energi pada berbagai sektor mendorong pengembangan teknologi yang mampu memanfaatkan energi panas secara lebih optimal sehingga dapat mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi proses. Salah satu komponen yang memiliki peranan penting dalam sistem perpindahan panas adalah *heat exchanger*. *Heat exchanger* merupakan alat yang digunakan untuk memindahkan energi panas dari fluida bertemperatur tinggi ke fluida bertemperatur rendah tanpa terjadi pencampuran secara langsung antara kedua fluida tersebut. Peralatan ini banyak digunakan pada pembangkit listrik, industri petrokimia, industri makanan dan minuman, sistem pendingin udara, kendaraan bermotor, hingga berbagai proses manufaktur yang membutuhkan pengaturan temperatur. Oleh karena itu, peningkatan performa *heat exchanger* menjadi salah satu

fokus utama dalam pengembangan teknologi perpindahan panas.

Kinerja *heat exchanger* sangat dipengaruhi oleh karakteristik fluida kerja yang digunakan. Semakin baik kemampuan fluida dalam menghantarkan panas, maka semakin tinggi pula performa perpindahan panas yang dapat dicapai. Namun demikian, sebagian besar fluida konvensional seperti air, minyak, maupun *ethylene glycol* memiliki konduktivitas termal yang relatif rendah. Kondisi tersebut menyebabkan laju perpindahan panas yang terjadi pada *heat exchanger* menjadi terbatas sehingga efisiensi sistem belum dapat dicapai secara optimal. Selain itu, keterbatasan sifat termofisika fluida konvensional juga menyebabkan ukuran alat penukar kalor cenderung lebih besar untuk memperoleh kapasitas perpindahan panas yang sama. Oleh karena itu, berbagai upaya terus dilakukan untuk meningkatkan kemampuan perpindahan panas melalui pengembangan fluida kerja yang memiliki sifat termal lebih baik.

Salah satu inovasi yang berkembang pesat dalam bidang perpindahan panas adalah nanofluida. Nanofluida merupakan fluida dasar yang ditambahkan nanopartikel berukuran kurang dari 100 nanometer ke dalamnya. Penambahan nanopartikel bertujuan untuk meningkatkan sifat termofisika fluida seperti konduktivitas termal, viskositas, massa jenis, dan karakteristik perpindahan panas secara keseluruhan. Sejak pertama kali diperkenalkan oleh Choi pada tahun 1995, nanofluida telah menjadi salah satu topik penelitian yang banyak dikembangkan karena terbukti mampu meningkatkan performa berbagai sistem perpindahan panas. Peningkatan konduktivitas termal yang dimiliki nanofluida memungkinkan proses perpindahan panas berlangsung lebih cepat dibandingkan fluida konvensional, sehingga teknologi ini dinilai memiliki prospek yang baik untuk diaplikasikan pada berbagai sistem termal.

Berbagai jenis nanopartikel telah digunakan dalam pengembangan nanofluida, seperti aluminium oksida (Al_2O_3), titanium dioksida (TiO_2), tembaga oksida (CuO), seng oksida (ZnO), *carbon nanotube*, serta material berbasis karbon lainnya. Di antara berbagai jenis nanopartikel tersebut, *graphene oxide* (GO) menjadi salah satu material yang paling menjanjikan karena memiliki konduktivitas termal tinggi, luas permukaan spesifik yang besar, stabilitas kimia yang baik, serta kemampuan dispersi yang lebih baik dibandingkan graphene murni. Karakteristik tersebut menjadikan *graphene oxide* sangat potensial untuk diaplikasikan sebagai bahan aditif dalam pembuatan nanofluida. Selain itu, penggunaan *graphene oxide* dalam konsentrasi yang relatif rendah telah dilaporkan mampu memberikan peningkatan sifat termofisika fluida tanpa menyebabkan peningkatan viskositas yang terlalu besar, sehingga tetap mendukung proses aliran fluida pada sistem perpindahan panas.

Graphene oxide merupakan material turunan graphene yang mengandung berbagai gugus fungsi oksigen seperti hidroksil, epoksi, karbonil, dan karboksil pada permukaannya. Keberadaan gugus-gugus oksigen tersebut menyebabkan *graphene oxide* lebih mudah terdispersi ke dalam fluida polar dibandingkan graphene biasa. Selain itu, luas permukaan yang besar memungkinkan *graphene oxide* meningkatkan interaksi termal antara nanopartikel dan fluida dasar sehingga berpotensi meningkatkan kemampuan perpindahan panas secara signifikan. Gugus fungsi oksigen tersebut juga berperan dalam meningkatkan stabilitas dispersi nanopartikel sehingga risiko pengendapan selama proses penggunaan nanofluida dapat diminimalkan.

Keberhasilan pemanfaatan nanofluida tidak hanya ditentukan oleh jenis nanopartikel yang digunakan, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh proses preparasi yang dilakukan. Dispersi nanopartikel yang tidak merata dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi atau penggumpalan partikel sehingga menurunkan stabilitas nanofluida dan mengurangi efektivitas perpindahan panas. Aglomerasi juga dapat menyebabkan perubahan sifat aliran fluida serta menurunkan kemampuan nanopartikel dalam meningkatkan konduktivitas termal. Oleh karena itu, proses preparasi menjadi tahapan penting yang harus dilakukan secara tepat untuk menghasilkan nanofluida yang homogen dan stabil.

Metode *two-step* merupakan salah satu metode preparasi nanofluida yang paling banyak digunakan karena relatif sederhana, ekonomis, dan mudah diaplikasikan pada berbagai jenis nanopartikel. Pada metode ini, nanopartikel yang telah tersedia dicampurkan ke dalam fluida dasar menggunakan proses pengadukan dan sonikasi. Kombinasi kedua proses tersebut bertujuan untuk memperoleh distribusi partikel yang merata sehingga mampu menghasilkan nanofluida dengan kualitas yang baik. Proses pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* membantu mencampurkan nanopartikel secara awal, sedangkan proses sonikasi memanfaatkan gelombang ultrasonik untuk memecah aglomerasi partikel sehingga penyebaran nanopartikel di dalam fluida menjadi lebih homogen.

Selain proses preparasi, karakterisasi material juga menjadi tahapan penting sebelum nanofluida digunakan pada aplikasi perpindahan panas. Karakterisasi dilakukan untuk memastikan bahwa material yang digunakan memiliki struktur, morfologi, dan komposisi unsur yang sesuai dengan karakteristik *graphene oxide*. Pengujian yang umum digunakan adalah *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy* (SEM-EDX) dan *X-Ray Diffraction* (XRD). SEM digunakan untuk mengamati morfologi permukaan material, EDX digunakan untuk mengetahui komposisi unsur penyusun material, sedangkan XRD digunakan untuk mengidentifikasi struktur kristal dan fase material. Informasi yang diperoleh dari hasil karakterisasi tersebut menjadi dasar untuk memastikan bahwa nanopartikel yang digunakan memiliki kualitas yang sesuai sebelum diaplikasikan pada penelitian perpindahan panas.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk melakukan preparasi dan karakterisasi awal nanofluida *graphene oxide–ethylene glycol* menggunakan metode *two-step*. Karakterisasi dilakukan menggunakan SEM-EDX dan XRD untuk memastikan kesesuaian material *graphene oxide* yang digunakan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengembangan nanofluida *graphene oxide–ethylene glycol* sebagai fluida kerja alternatif yang berpotensi meningkatkan performa

perpindahan panas pada *heat exchanger* tipe *double pipe*. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi ilmiah mengenai kualitas preparasi dan karakteristik material yang digunakan sehingga dapat menjadi acuan bagi penelitian lanjutan terkait pengujian sifat termofisika maupun evaluasi performa perpindahan panas menggunakan nanofluida berbasis *graphene oxide*.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen laboratorium yang bertujuan untuk melakukan preparasi dan karakterisasi awal nanofluida *graphene oxide–ethylene glycol* sebagai fluida kerja yang akan digunakan pada penelitian perpindahan panas menggunakan *heat exchanger* tipe *double pipe*. Penelitian difokuskan pada proses pembuatan nanofluida, pengamatan morfologi material, analisis komposisi unsur, serta identifikasi struktur kristal nanopartikel *graphene oxide*. Metode eksperimen dipilih karena memungkinkan pengendalian kondisi pengujian secara sistematis sehingga hasil preparasi dan karakterisasi material dapat diperoleh dengan tingkat ketelitian yang baik.

Penelitian menggunakan metode eksperimen laboratorium. Bahan yang digunakan pada penelitian ini meliputi nanopartikel *graphene oxide* sebagai bahan aditif dan *ethylene glycol* sebagai fluida dasar (*base fluid*). Pemilihan *ethylene glycol* didasarkan pada sifatnya yang banyak digunakan sebagai fluida perpindahan panas karena memiliki stabilitas termal yang baik dan mampu bekerja pada rentang temperatur yang cukup luas.

Bahan yang digunakan meliputi:

1. Nanopartikel Graphene Oxide
2. Ethylene Glycol

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini dipilih sesuai dengan tahapan preparasi dan karakterisasi material, sehingga mampu mendukung proses pencampuran nanopartikel serta pengujian karakteristik material secara optimal.

Peralatan yang digunakan:

1. Magnetic Stirrer
2. Sonikator
3. Timbangan Digital
4. Gelas Beker
5. SEM-EDX
6. XRD

Preparasi nanofluida dilakukan menggunakan metode *two-step method*. Metode ini dipilih karena memiliki proses yang relatif sederhana, biaya yang lebih rendah, serta banyak digunakan pada penelitian nanofluida. Selain mudah diaplikasikan, metode ini juga mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik apabila dikombinasikan dengan proses pengadukan dan sonikasi. Tahapan preparasi dilakukan secara sistematis untuk memperoleh nanofluida yang homogen sehingga dapat digunakan pada proses karakterisasi maupun penelitian lanjutan. Tahapan Preparasi Nanofluida

1. Menimbang graphene oxide sesuai variasi konsentrasi.
2. Menyiapkan ethylene glycol sebagai fluida dasar.
3. Mencampurkan graphene oxide ke dalam ethylene glycol menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit.
4. Melakukan proses sonikasi selama 60 menit untuk memperoleh dispersi yang homogen.
5. Menyimpan nanofluida dalam wadah tertutup sebelum dilakukan pengujian.

Karakterisasi material dilakukan untuk memastikan bahwa nanopartikel *graphene oxide* yang digunakan memiliki karakteristik yang sesuai sebelum diaplikasikan sebagai bahan aditif nanofluida. Pengujian ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai morfologi permukaan, komposisi unsur penyusun, serta struktur kristal material sehingga kualitas *graphene oxide* dapat diketahui secara lebih menyeluruh. Karakterisasi dilakukan menggunakan:

1. SEM-EDX untuk mengetahui morfologi permukaan dan kandungan unsur kimia graphene oxide.
2. XRD untuk mengetahui struktur kristal dan pola difraksi material graphene oxide.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Preparasi Nanofluida Graphene Oxide–Ethylene Glycol

Preparasi nanofluida dilakukan menggunakan metode *two-step* dengan mencampurkan nanopartikel *graphene oxide* ke dalam fluida dasar *ethylene glycol*. Metode ini dipilih karena relatif sederhana, mudah diaplikasikan, dan banyak digunakan pada penelitian nanofluida. Selain itu, metode *two-step* mampu menghasilkan nanofluida dengan kualitas yang baik apabila proses pencampuran dilakukan secara optimal melalui kombinasi pengadukan dan sonikasi. Variasi konsentrasi *graphene oxide* yang digunakan dalam penelitian yaitu 0%, 0,004%, 0,005%, dan 0,006% untuk mengetahui pengaruh penambahan nanopartikel terhadap karakteristik awal nanofluida.

Proses pencampuran diawali dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* selama 30 menit. Pengadukan bertujuan untuk membantu penyebaran awal nanopartikel ke seluruh volume fluida dasar sehingga campuran menjadi lebih merata. Setelah proses pengadukan selesai, campuran dilanjutkan dengan proses sonikasi selama 60 menit menggunakan *ultrasonic bath*. Kombinasi kedua tahapan tersebut diharapkan mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang lebih homogen sebelum dilakukan proses karakterisasi.

Proses sonikasi menghasilkan gelombang ultrasonik yang mampu memecah aglomerasi nanopartikel sehingga distribusi *graphene oxide* dalam *ethylene glycol* menjadi lebih merata. Tahapan ini sangat penting karena aglomerasi partikel dapat menyebabkan sedimentasi yang berdampak pada penurunan kualitas nanofluida. Selain itu, penyebaran nanopartikel yang homogen akan meningkatkan stabilitas suspensi sehingga nanopartikel dapat berinteraksi secara lebih efektif dengan fluida dasar. Dengan demikian, proses sonikasi menjadi salah satu

UNESA Universitas Negeri Surabaya

tahapan yang menentukan keberhasilan preparasi nanofluida.

Hasil pengamatan secara visual menunjukkan bahwa nanofluida yang dihasilkan memiliki warna yang relatif seragam pada seluruh volume fluida. Semakin tinggi konsentrasi *graphene oxide* yang ditambahkan, warna nanofluida cenderung menjadi lebih gelap. Perubahan warna tersebut menunjukkan bahwa nanopartikel *graphene oxide* telah terdispersi di dalam fluida dasar. Perbedaan intensitas warna pada setiap variasi konsentrasi juga menunjukkan adanya peningkatan jumlah nanopartikel yang tersuspensi di dalam *ethylene glycol*, namun secara visual tidak terlihat adanya pemisahan fase setelah proses preparasi selesai.

Secara umum, proses preparasi yang dilakukan berhasil menghasilkan nanofluida yang homogen dan tidak menunjukkan adanya pengendapan partikel selama pengamatan awal setelah proses sonikasi selesai. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa metode *two-step* yang dipadukan dengan pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dan proses sonikasi selama 60 menit mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik. Kondisi ini menjadi dasar yang penting sebelum dilakukan pengujian karakterisasi menggunakan SEM-EDX dan XRD, karena kualitas preparasi nanofluida akan sangat mempengaruhi hasil karakterisasi material maupun penelitian lanjutan mengenai sifat termofisika dan performa perpindahan panas pada *heat exchanger* tipe *double pipe*.

Karakterisasi Morfologi Menggunakan SEM

Karakterisasi morfologi *graphene oxide* dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui bentuk permukaan dan struktur morfologi nanopartikel yang digunakan dalam penelitian. Selain itu, pengujian SEM juga memberikan informasi mengenai ukuran relatif, susunan lapisan, serta karakteristik permukaan material yang berpengaruh terhadap kualitas nanopartikel sebagai bahan aditif nanofluida.

Hasil pengamatan SEM menunjukkan bahwa *graphene oxide* memiliki morfologi berupa lembaran tipis (*sheet-like structure*) yang saling bertumpuk dan membentuk struktur berlapis. Pada beberapa bagian terlihat adanya lipatan dan kerutan yang merupakan karakteristik umum material *graphene oxide*. Struktur tersebut menunjukkan bahwa material masih mempertahankan bentuk khasnya setelah proses sintesis sehingga sesuai dengan karakteristik morfologi *graphene oxide* yang banyak dilaporkan pada berbagai penelitian.

Morfologi berbentuk lembaran tersebut memberikan keuntungan dalam aplikasi perpindahan panas karena memiliki luas permukaan spesifik yang besar. Luas permukaan yang tinggi memungkinkan kontak yang lebih baik antara nanopartikel dengan fluida dasar sehingga meningkatkan interaksi termal selama proses perpindahan panas. Semakin luas bidang kontak antara nanopartikel dan fluida dasar, maka proses perpindahan energi panas dapat berlangsung lebih efektif sehingga berpotensi meningkatkan kinerja nanofluida sebagai fluida kerja.

Selain itu, struktur berlapis yang dimiliki *graphene oxide* juga dapat berfungsi sebagai jalur penghantar panas yang efektif. Karakteristik ini menjadi salah satu alasan mengapa *graphene oxide* banyak digunakan sebagai nanopartikel dalam pengembangan nanofluida untuk aplikasi perpindahan panas. Adanya lipatan pada permukaan lembaran juga menunjukkan fleksibilitas struktur material yang dapat membantu mempertahankan kestabilan dispersi nanopartikel di dalam fluida dasar selama proses preparasi.

Hasil pengamatan SEM yang diperoleh menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik *graphene oxide* yang dilaporkan pada berbagai penelitian sebelumnya. Morfologi berupa lembaran tipis berlapis dengan permukaan yang tidak rata merupakan ciri khas *graphene oxide* akibat adanya gugus fungsi oksigen pada permukaannya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa material yang digunakan memiliki morfologi yang sesuai untuk diaplikasikan sebagai bahan aditif nanofluida, sehingga layak digunakan pada penelitian lanjutan mengenai pengujian sifat termofisika dan performa perpindahan panas pada *heat exchanger* tipe *double pipe*.

Analisis Komposisi Unsur Menggunakan EDX

Analisis Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDX) dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur penyusun graphene oxide. Hasil analisis menunjukkan bahwa unsur karbon dan oksigen merupakan unsur dominan pada material yang digunakan.

Tabel 2. Komposisi Unsur Graphene Oxide Berdasarkan Hasil EDX

Unsur	Persentase Berat (%)
Karbon (C)	55,80
Oksigen (O)	37,19
Sulfur (S)	5,91
Aluminium (Al)	0,52
Kalium (K)	0,58

Berdasarkan Tabel 2 terlihat bahwa karbon merupakan unsur dominan dengan persentase sebesar 55,80%, sedangkan oksigen memiliki persentase sebesar 37,19%. Tingginya kandungan karbon menunjukkan bahwa material yang digunakan masih mempertahankan struktur dasar graphene.

Keberadaan unsur oksigen menunjukkan bahwa graphene telah mengalami proses oksidasi sehingga membentuk graphene oxide. Gugus fungsi yang mengandung oksigen berperan penting dalam meningkatkan kemampuan dispersi graphene oxide di dalam fluida dasar.

Selain karbon dan oksigen, terdapat beberapa unsur lain dalam jumlah yang relatif kecil. Keberadaan unsur-unsur tersebut diduga berasal dari proses sintesis atau residu bahan kimia yang digunakan selama pembuatan graphene oxide.

UNESA Universitas Negeri Surabaya

Hasil EDX yang diperoleh mengonfirmasi bahwa material yang digunakan merupakan graphene oxide yang sesuai untuk digunakan pada proses pembuatan nanofluida.

Karakterisasi Struktur Kristal Menggunakan XRD

Karakterisasi menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk mengidentifikasi struktur kristal material *graphene oxide*. Pengujian ini penting untuk memastikan bahwa material yang digunakan memiliki karakteristik kristalografi yang sesuai dengan *graphene oxide*. Selain itu, analisis XRD juga digunakan untuk mengetahui perubahan struktur kristal yang terjadi akibat proses oksidasi pada graphene sehingga dapat memberikan informasi mengenai kualitas material yang digunakan.

Hasil pengujian menunjukkan adanya puncak difraksi utama pada sudut 2θ sebesar **10,32°**. Puncak tersebut merupakan karakteristik khas *graphene oxide* yang menunjukkan adanya peningkatan jarak antar lapisan akibat keberadaan gugus oksigen pada struktur material. Munculnya puncak difraksi tersebut mengindikasikan bahwa proses oksidasi telah berlangsung dengan baik sehingga menghasilkan struktur kristal yang sesuai dengan karakteristik *graphene oxide*.

Pada graphene murni umumnya puncak difraksi muncul pada sudut sekitar **26°**. Setelah mengalami proses oksidasi, puncak tersebut bergeser menuju sudut yang lebih rendah. Pergeseran ini menunjukkan bahwa proses oksidasi telah berhasil meningkatkan jarak antar lapisan graphene sehingga terbentuk struktur *graphene oxide*. Peningkatan jarak antar lapisan tersebut disebabkan oleh masuknya gugus fungsi oksigen ke dalam struktur graphene, sehingga susunan lapisan material menjadi lebih renggang dibandingkan graphene murni.

Keberadaan puncak difraksi pada sudut **10,32°** menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki karakteristik yang sesuai dengan *graphene oxide*. Hasil tersebut juga sejalan dengan berbagai penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa *graphene oxide* memiliki puncak difraksi utama pada rentang **10°–12°**. Kesesuaian hasil pengujian ini menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki struktur kristal yang baik dan memenuhi karakteristik umum *graphene oxide* sebagai bahan aditif nanofluida.

Berdasarkan hasil pengujian XRD dapat disimpulkan bahwa material yang digunakan dalam penelitian telah memenuhi karakteristik struktur kristal *graphene oxide* dan layak digunakan sebagai bahan aditif nanofluida. Struktur kristal yang teridentifikasi melalui pengujian XRD mendukung hasil karakterisasi SEM-EDX, sehingga dapat dinyatakan bahwa material yang digunakan memiliki morfologi, komposisi unsur, dan struktur kristal yang sesuai untuk diaplikasikan pada penelitian lanjutan mengenai sifat termofisika dan performa perpindahan panas pada *heat exchanger* tipe *double pipe*.

Homogenitas dan Potensi Aplikasi Nanofluida

Homogenitas merupakan salah satu faktor penting dalam pengembangan nanofluida karena sangat mempengaruhi kestabilan dan performa termal yang dihasilkan. Nanofluida yang homogen memungkinkan nanopartikel terdistribusi secara merata sehingga dapat berkontribusi secara optimal dalam meningkatkan sifat termofisika fluida. Sebaliknya, distribusi nanopartikel yang tidak merata dapat menyebabkan terjadinya aglomerasi dan sedimentasi, sehingga mengurangi efektivitas nanofluida dalam proses perpindahan panas.

Hasil preparasi yang dilakukan menunjukkan bahwa kombinasi proses pengadukan menggunakan *magnetic stirrer* dan sonikasi menggunakan *ultrasonic bath* mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang baik. Tidak ditemukan indikasi pengendapan partikel secara signifikan selama pengamatan awal setelah proses preparasi. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa metode *two-step* yang digunakan mampu menghasilkan campuran nanopartikel dan fluida dasar yang relatif homogen, sehingga nanopartikel dapat terdistribusi secara merata di dalam *ethylene glycol*.

Keberhasilan preparasi dan karakterisasi awal menunjukkan bahwa nanofluida *graphene oxide–ethylene glycol* yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik untuk digunakan pada penelitian lanjutan. Karakteristik morfologi, komposisi unsur, dan struktur kristal yang telah terkonfirmasi memberikan dasar yang kuat untuk pengujian *thermophysical properties* maupun penelitian performa perpindahan panas pada *heat exchanger* tipe *double pipe*. Dengan kualitas dispersi yang baik, nanofluida yang dihasilkan diharapkan mampu memberikan peningkatan karakteristik perpindahan panas dibandingkan fluida konvensional, sehingga berpotensi menjadi alternatif fluida kerja yang lebih efisien pada berbagai aplikasi sistem perpindahan panas.

Simpulan

Berdasarkan hasil preparasi dan karakterisasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa nanofluida graphene oxide–ethylene glycol berhasil dibuat menggunakan metode two-step melalui proses pengadukan menggunakan magnetic stirrer selama 30 menit dan sonikasi selama 60 menit. Proses preparasi tersebut mampu menghasilkan dispersi nanopartikel yang homogen sehingga graphene oxide dapat terdistribusi secara merata di dalam fluida dasar ethylene glycol.

Hasil karakterisasi menggunakan SEM menunjukkan bahwa graphene oxide memiliki morfologi berupa lembaran tipis (sheet-like structure) yang saling bertumpuk dan membentuk struktur berlapis dengan permukaan yang tidak beraturan. Karakteristik morfologi tersebut menunjukkan luas permukaan yang tinggi sehingga berpotensi meningkatkan interaksi termal antara nanopartikel dan fluida dasar.

Analisis EDX menunjukkan bahwa unsur penyusun utama graphene oxide adalah karbon sebesar 55,80% dan oksigen sebesar 37,19%, sedangkan unsur lain seperti sulfur, aluminium, dan kalium hanya ditemukan dalam jumlah yang relatif kecil. Dominasi unsur karbon dan oksigen mengonfirmasi bahwa material yang digunakan merupakan graphene oxide yang telah mengalami proses oksidasi.

Hasil pengujian XRD menunjukkan adanya puncak difraksi utama pada sudut 2θ sebesar 10,32° yang merupakan karakteristik khas graphene oxide. Hasil tersebut menunjukkan bahwa material yang digunakan memiliki struktur kristal yang sesuai dengan graphene oxide dan sejalan dengan hasil penelitian terdahulu.

Secara keseluruhan, hasil preparasi dan karakterisasi menunjukkan bahwa nanofluida graphene oxide–ethylene glycol yang dihasilkan memiliki kualitas yang baik, dispersi yang homogen, serta karakteristik material yang sesuai untuk digunakan pada penelitian lanjutan. Nanofluida yang telah dipreparasi berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut dalam pengujian thermophysical properties maupun aplikasi perpindahan panas pada heat exchanger tipe double pipe guna meningkatkan performa sistem perpindahan panas.

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

Alanyalıoğlu, M., Segura, J. J., Oro-Sole, J., & Casañ-Pastor, N. (2022). The synthesis of graphene sheets with controlled thickness and order using surfactant-assisted electrochemical processes. Carbon, 50(1), 142–152.

Ciawi, Y., Supariarta, M. A., Hidayati, A. M., & Tonyes, S. G. (2023). Graphene Oxide in Construction: A Comprehensive Review on the Prospects, Challenges, and Sustainable Cement Reinforcement. Media Komunikasi Teknik Sipil, 29(1), 70–83.

Diniardi, E., Basri, H., Ramadhan, A. I., & Almanda, D. (2021). Studi Pengembangan Hibrida Nanofluida Untuk Aplikasi di Bidang Teknik. Jurnal Teknologi, 13(2), 237–246.

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.

Hardian, A., Ramadhiany, A. A., Syarif, D. G., & Budiman, S. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Nanopartikel untuk Aplikasi Nanofluida. Alchemy Jurnal Penelitian Kimia, 13(2), 145–154.

UNESA Universitas Negeri Surabaya