

Jurnal Inovasi Fisika Indonesia (IFI) Volume 14 Nomor 3 Tahun 2025, hal 369-376

SINTESIS DAN KARAKTERISASI GRAPHENE OXIDE (GO) YANG DIMODIFIKASI DENGAN NANOPARTIKEL SILIKA BERBASIS LIMBAH CANGKANG SAWIT

¹⁾Frizky Audis Paramundhita, ²⁾Munasir, ³⁾Evi Suaebah

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: frizkyaudis.21015@mhs.unesa.ac.id

²⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: munasir_physics@unesa.ac.id

³⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: evisuaebah@unesa.ac.id

Abstrak

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menghasilkan dan mengkaji karakteristik nanokomposit graphene oxide (GO) yang telah dimodifikasi dengan nanopartikel silika (SiO_2), menggunakan limbah cangkang kelapa sawit sebagai sumber karbon. Tahapan awal meliputi pembuatan karbon aktif melalui proses aktivasi kimia menggunakan larutan NaOH, kemudian dilanjutkan dengan sintesis GO melalui metode Hummers yang telah dimodifikasi, serta sintesis komposit GO- SiO_2 dengan memanfaatkan prekursor TEOS (Tetraethyl Orthosilicate). Karakterisasi struktur material menggunakan X-Ray Diffraction (XRD) dan Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). Berdasarkan hasil uji karakterisaasi, data XRD menunjukkan pergeseran sudut difraksi dari $2\theta = 24.2^\circ$ pada GO menjadi 23.8° pada GO- SiO_2 , yang mengindikasikan peningkatan jarak antar bidang kristal dari 3.67 \AA menjadi 3.73 \AA , disertai dengan penurunan ukuran kristalit dari 3.7 nm menjadi 3.5 nm . Spektrum FTIR menunjukkan kehadiran gugus O-H, C=O, dan Si-O-Si, menguatkan terbentuknya struktur komposit. Analisis SEM memperlihatkan adanya nanopartikel silika yang menempel pada permukaan GO, sementara hasil EDX mengonfirmasi keberadaan unsur silikon sebesar 3,6% pada komposit GO- SiO_2 , disertai peningkatan oksigen dan penurunan karbon yang menunjukkan keberhasilan proses modifikasi. Secara keseluruhan, hasil ini mengindikasikan bahwa limbah cangkang kelapa sawit memiliki prospek sebagai sumber material karbon yang berkelanjutan untuk pengembangan komposit GO- SiO_2 yang fungsional dan ramah lingkungan.

Kata Kunci: Graphene Oxide, Silika, Cangkang Kelapa Sawit, Komposit, Karakterisasi.

Abstract

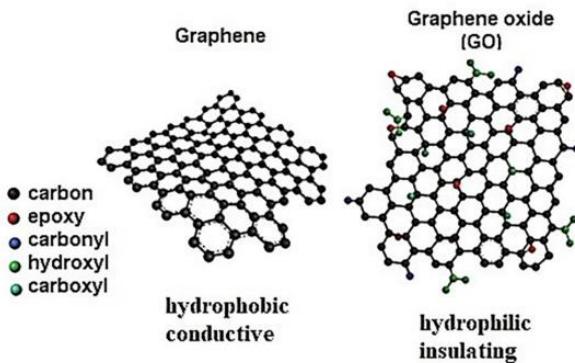
This study aims to produce and evaluate the characteristics of graphene oxide (GO) nanocomposites modified with silica nanoparticles (SiO_2) by utilizing palm shell waste as a carbon source. The initial stage includes the production of activated carbon through a chemical activation process using NaOH solution. Then continued with the synthesis of GO through the modified Hummers method, and the synthesis of GO- SiO_2 composites using Tetraethyl Orthosilicate (TEOS) as a precursor. Characterization of the material structure was carried out using X-Ray Diffraction (XRD) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR). XRD analysis showed a shift in the diffraction angle from $2\theta = 24.2^\circ$ for GO to 23.8° for GO- SiO_2 , which indicated an increase in the interlayer distance from 3.67 \AA to 3.73 \AA , accompanied by a decrease in the crystallite size from 3.7 nm to 3.5 nm . The FTIR spectrum shows the presence of O-H, C=O, and Si-O-Si groups, strengthening the formation of the composite structure. SEM analysis shows the presence of silica nanoparticles attached to the GO surface, while EDX results confirm the presence of silicon elements of 3.6% in the GO- SiO_2 composite, accompanied by an increase in oxygen and a decrease in carbon indicating the success of the modification process. Overall, these results indicate that palm kernel shell waste has the prospect of being a sustainable source of carbon material for the development of functional and environmentally friendly GO- SiO_2 composites.

Keywords: Graphene Oxide, Silica, Palm Shell, Composite, Characterization

I. PENDAHULUAN

Penggunaan energi terbarukan telah menjadi salah satu prioritas utama dalam upaya global untuk menjaga keseimbangan lingkungan. Indonesia, sebagai negara kepulauan yang dianugerahi kekayaan sumber daya alam melimpah memiliki potensi besar dalam pengembangan energi hijau di berbagai macam sektor. Dalam industri perkebunan, Indonesia dikenal sebagai produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia, diikuti oleh Malaysia. Sektor ini memegang peranan penting sebagai salah satu pilar ekonomi, tetapi juga menghadirkan tantangan bagi lingkungan. Industri kelapa sawit memiliki kontribusi yang cukup besar di bidang perkenomian melalui ekspor dan kesempatan kerja, memenuhi permintaan domestik dan internasional akan produk kelapa sawit (Zainal et al., 2025). Peningkatan luas perkebunan kelapa sawit tidak hanya menghasilkan minyak sawit, tetapi juga menghasilkan produk samping atau limbah seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) yang kaya akan lignoselulosa, dan dihasilkan di lapangan (Mahat & Shamsudin, 2020). Terdapat beberapa metode yang digunakan dalam pengolahan limbah dari industri kelapa sawit, salah satunya adalah sistem kolam terbuka. Sistem ini mampu mencapai batas standar, tetapi membutuhkan waktu yang lama dan membutuhkan banyak ruang. Oleh karena itu, disarankan untuk mengubah pelepas kelapa sawit (*Oil Palm Frond*) dan cangkang kelapa sawit (*Palm Kernel Shell*) menjadi karbon aktif (*carbon active*) untuk memanfaatkan limbah pertanian yang melimpah ini dengan lebih baik dan memperoleh keuntungan bagi lingkungan dan ekonomi (Jasri et al., 2023).

Karbon aktif adalah bentuk karbon amorf yang tersusun dari lapisan-lapisan datar atom karbon yang saling terikat melalui ikatan kovalen dalam pola kisi heksagonal, di mana setiap sudutnya diisi oleh satu atom karbon. Bahan ini dapat diperoleh dari cangkang kelapa sawit yang mengandung sekitar 20,5% karbon, kemudian diproses melalui pemanasan pada suhu tinggi dalam kondisi tanpa oksigen, menghasilkan arang dengan daya serap tinggi dan luas permukaan yang besar setelah melalui tahap aktivasi. Oleh karena itu, karbon aktif dapat dimanfaatkan untuk pembuatan material yang multifungsi dan terbarukan. Pengembangan inovasi dari karbon aktif dapat dilakukan ke bentuk material seperti *graphene*. *Graphene* merupakan material yang menarik karena memiliki kerangka dua dimensi yang tidak umum dengan struktur heksagonal dari lapisan monomolekul tunggal atom karbon hibridisasi sp² (Alam et al., 2017; Guerrero-Contreras & Caballero-Briones, 2015). Berdasarkan standar terbaru ISO/TS 80004-13:2017, *graphene* didefinisikan sebagai satu lapisan atom karbon di mana setiap atom berikatan kovalen dengan tiga atom karbon lainnya dalam pola heksagonal menyerupai sarang lebah. Struktur ini secara umum dapat digambarkan sebagai lembaran tunggal dari grafit monokristalin yang tersusun rapat oleh atom-atom karbon dalam konfigurasi cincin benzena (Tadyszak et al., 2018).



Gambar 1. Struktur Kimia dari Graphene Oxide (Nayak, 2016)

Graphene oxide (GO) merupakan turunan *graphene* yang dihasilkan melalui metode oksidasi grafit, seperti metode Hummers, dan dikenal memiliki luas permukaan tinggi serta gugus fungsional seperti hidroksil, epoksida, dan karboksilat. Keberadaan gugus tersebut membuat GO mudah terdispersi dalam air dan mampu berinteraksi dengan molekul aromatik melalui ikatan π-π, menjadikannya kandidat unggul dalam berbagai

aplikasi seperti sensor, penyimpanan energi, serta sistem penghantaran obat. Namun, meskipun memiliki banyak keunggulan, GO juga menunjukkan beberapa keterbatasan penting, seperti toksitas in vitro dan in vivo serta kecenderungan untuk mengalami agregasi, yang dapat menurunkan stabilitas dan efektivitas aplikatifnya.

Untuk mengatasi kelemahan tersebut, berbagai penelitian telah mengembangkan strategi fungsionalisasi GO dengan menambahkan nanopartikel silika (SiO_2), yang dikenal bersifat tidak toksik, stabil secara kimia, dan memiliki ukuran pori yang dapat disesuaikan. Kombinasi GO dan SiO_2 tidak hanya meningkatkan stabilitas struktur dan kompatibilitas biologis GO, tetapi juga memperluas potensi penggunaannya, terutama dalam bidang biomedis seperti sistem penghantaran obat dan terapi berbasis nanomaterial. Dengan demikian, sintesis komposit GO- SiO_2 menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk menghasilkan material fungsional yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan (Khanmohammadi et al., 2023; Li et al., 2021; Theodorakis et al., 2021).

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan metode sintesis nanokomposit GO- SiO_2 menggunakan limbah cangkang sawit. Pendekatan kualitatif digunakan untuk menganalisis karakterisasi fisik dan kimia material melalui teknik seperti XRD dan FTIR. Diharapkan, komposit yang dihasilkan tidak hanya memberikan solusi pengelolaan limbah, namun juga menghasilkan material dengan sifat mekanik, adsorptif, dan stabilitas yang unggul. Selain itu, studi ini diharapkan menutup celah pengetahuan dalam penggunaan biomassa lokal sebagai bahan baku material komposit fungsional.

II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap dimulai dengan tahap aktivasi karbon, tahap sintesis *Graphene Oxide* (GO), dan tahap komposit GO- SiO_2 .

1. Tahap Aktivasi Karbon

Cangkang kelapa sawit yang telah dibentuk menjadi arang ditumbuk menggunakan mortal dan alu, kemudian diayak dengan mesh 200 untuk memperoleh serbuk karbon yang homogen. Serbuk ini kemudian diaktivasi secara kimia dengan merendamnya dalam larutan NaOH 0,5 M selama 24 jam, menggunakan perbandingan massa karbon dan larutan sebesar 1:3 (g/g). Proses perendaman ini bertujuan untuk membuka pori-pori karbon, menghilangkan kontaminan organik maupun anorganik, serta meningkatkan luas permukaan dan porositas. Setelah itu, sampel dikalsinasi dalam furnace pada suhu 800°C, di mana peningkatan suhu karbonisasi memperdalam reaksi polimerisasi, memperkecil diameter partikel, serta memperluas mikropori, sehingga meningkatkan luas permukaan spesifik, volume total pori, dan jumlah mikroporositas. Arang yang dihasilkan dari proses karbonisasi selanjutnya dicuci dengan larutan HCl 1 M dan air distilasi hingga pH-nya menjadi netral, kemudian dikeringkan pada suhu 110°C selama satu jam. Karbon aktif yang diperoleh dari proses ini kemudian digunakan sebagai bahan utama dalam sintesis *graphene oxide*.

2. Tahap Sintesis *Graphene Oxide* (GO)

Graphene oxide (GO) disintesis menggunakan metode *Hummers* yang dimodifikasi, dimulai dengan mencampurkan 1 gram karbon aktif dan 0,5 gram NaNO_3 ke dalam 25 mL H_2SO_4 , lalu diaduk selama 30 menit dalam ice bath. Selanjutnya, 3 gram KMnO_4 ditambahkan secara perlahan sambil diaduk, dan pengadukan dilanjutkan selama 3 jam hingga larutan berubah menjadi hijau tua. Larutan kemudian dikeluarkan dari ice bath dan diaduk selama 1 jam pada suhu 40°C. Setelah itu, dilakukan dua tahap pengenceran berturut-turut: pertama dengan menambahkan 50 mL aquades dan diaduk selama 1 jam dalam ice bath, lalu yang kedua dengan menambahkan 100 mL aquades dan diaduk kembali selama 1 jam dalam ice bath. Setelah setiap tahap pengenceran, larutan kembali diaduk selama 1 jam pada suhu konstan 40°C. Reaksi dihentikan dengan penambahan 5 mL H_2O_2 secara perlahan untuk menghilangkan sisa KMnO_4 . GO yang terbentuk kemudian dimurnikan melalui proses pencucian menggunakan *centrifuge* hingga pH netral, kemudian dioven hingga kering pada suhu 60°C selama 12 jam.

3. Tahap Komposit GO-SiO₂

Sintesis komposit GO-SiO₂ dilakukan melalui beberapa tahapan, dimulai dengan mendispersikan 0,1 gram GO ke dalam 4,9 gram air menggunakan proses sonikasi selama 10 menit untuk memperoleh dispersi yang homogen, kemudian ditambahkan 19,7 gram etanol dan disonikasi kembali selama 30 menit. Selanjutnya, 0,5 gram *tetraethyl orthosilicate* (TEOS) dilarutkan dalam 2,37 gram etanol dan disonikasi selama 10 menit, lalu larutan ini diteteskan perlahan ke dalam larutan GO sambil diaduk menggunakan hotplate. Setelah pencampuran, ditambahkan 0,36 gram larutan amonia secara bertahap untuk membentuk lapisan silika (SiO₂) di permukaan GO. Campuran diaduk pada kecepatan 350 rpm dan dibiarkan bereaksi selama 18 jam, kemudian disentrifugasi selama 2-3 menit untuk memisahkan padatan. Padatan dicuci dengan etanol beberapa kali, diikuti oleh pencucian menggunakan aquades sebanyak 4-5 kali hingga pH netral tercapai, guna menghilangkan sisa reaktan dan meningkatkan kemurnian komposit. Kemudian, komposit dikeringkan dalam oven pada suhu 60°C selama 2 jam, dengan tujuan mempertahankan integritas struktur material.

B. Teknik Pengumpulan Data

Serbuk GO yang sudah dibuat dilakukan beberapa karakterisasi untuk membuktikan bahwa sampel tersebut benar sampel GO. Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan untuk mengetahui fasa GO, data yang diperoleh diolah kembali menggunakan software Origin. Analisis Fourier Transform Infrared (FTIR) dilakukan untuk mengenali gugus ikatan kimia yang terdapat pada material GO. Proses identifikasi dilakukan dengan mencocokkan dan membandingkan bilangan gelombang, selanjutnya data yang diperoleh akan diproses kembali menggunakan perangkat lunak Origin.

C. Teknik Pengolahan Data

Pada data XRD didapatkan parameter seperti posisi puncak (2θ), intensitas puncak, dan lebar puncak (FWHM) dianalisis untuk menentukan ukuran kristal, struktur kristal, dan fase material. Untuk menentukan jarak antar bidang kristal menggunakan Hukum Bragg (Bragg, 1913):

$$n\lambda = 2 d \sin \theta \quad (1)$$

Dimana :

n : bilangan bulat orde difraksi

λ : panjang gelombang sinar x

d : jarak antar bidang kristal

θ : sudut difraksi

Sedangkan untuk menghitung ukuran kristalit menggunakan Persamaan Scherrer (Scherrer, 1918):

$$D = \frac{K\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (2)$$

Dimana :

D : Ukuran kristalit (nm)

K : faktor bentuk

λ : panjang gelombang sinar-X

β : lebar puncak pada setengah tinggi (dalam radian)

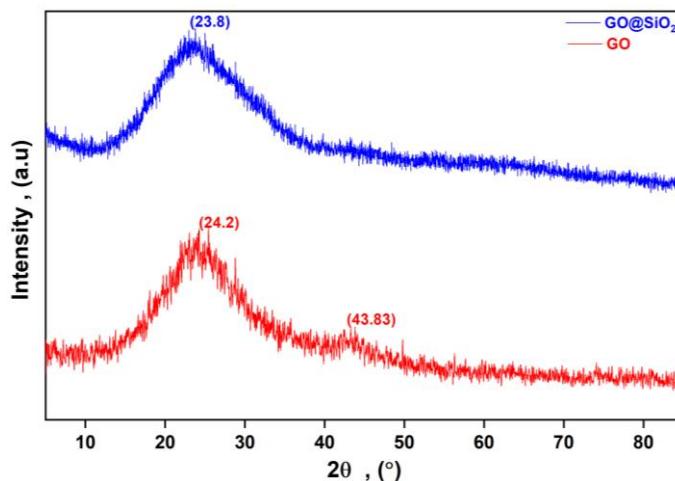
θ : sudut Bragg

III.HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisa Data X-Ray Diffraction (XRD)

Hasil analisis XRD pada sampel GO dan komposit GO-SiO₂ menunjukkan pola difraksi khas yang mencerminkan perubahan struktur kristal akibat proses modifikasi disajikan pada **Gambar 2**. Sampel GO menunjukkan puncak lebar pada sudut $2\theta = 24,2^\circ$, yang sesuai dengan bidang kristal (002), menandakan

struktur semi-kristalin dari GO. Setelah dilakukan modifikasi dengan nanopartikel silika, puncak utama mengalami pergeseran menjadi $2\theta = 23,8^\circ$ pada komposit GO-SiO₂.

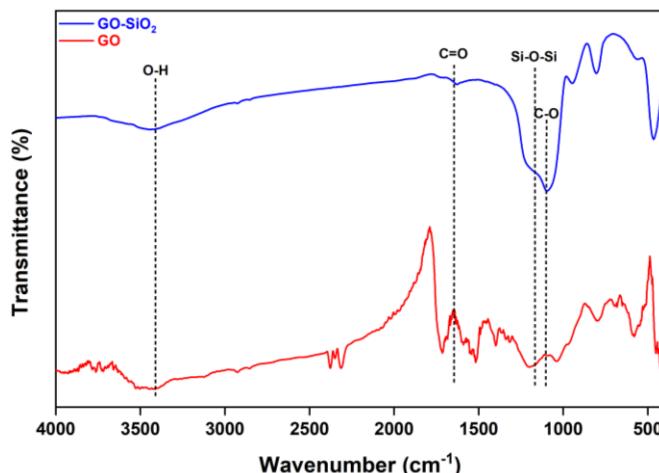


Gambar 2. Pola Difraksi GO dan GO-SiO₂

Pergeseran puncak ini mengindikasikan adanya peningkatan jarak antar bidang (interlayer spacing) akibat interkalasi SiO₂. Berdasarkan persamaan Bragg, nilai jarak antar bidang untuk GO adalah 3,67 Å, sedangkan untuk GO-SiO₂ meningkat menjadi 3,73 Å, menandakan terjadinya ekspansi struktur lapisan GO. Pergeseran ini juga mencerminkan terbentuknya interaksi antara gugus oksigen (-OH, -COOH) pada GO dan gugus silanol (-Si-OH) dari SiO₂ yang menyebabkan distorsi dan pembukaan struktur lamellar (Liu et al., 2020). Berdasarkan estimasi dari bentuk grafik, ukuran kristalit untuk GO berada pada kisaran 3,7 nm, sedangkan setelah dikompositkan dengan SiO₂, ukuran kristalit sedikit menurun menjadi sekitar 3,5 nm, yang menunjukkan peningkatan amorfinitas akibat gangguan struktur dari silika. Pola difraksi yang melebar pada GO-SiO₂ juga memperkuat indikasi bahwa penambahan silika menghambat pembentukan kristal yang lebih besar dan menjaga struktur tetap tersebar. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa modifikasi GO dengan nanopartikel anorganik menyebabkan penurunan kristalinitas namun meningkatkan kestabilan struktur dan luas permukaan. Dengan demikian, komposit GO-SiO₂ memiliki potensi sebagai material fungsional dengan struktur berlapis yang lebih terbuka dan aktif.

B. Analisa Data FTIR

Analisis gugus fungsi karakteristik material GO dan komposit GO-SiO₂ disajikan pada Gambar 3. Hasil analisis menunjukkan adanya gugus silanol dan silikat Si-O serta gugus karbon C-H.

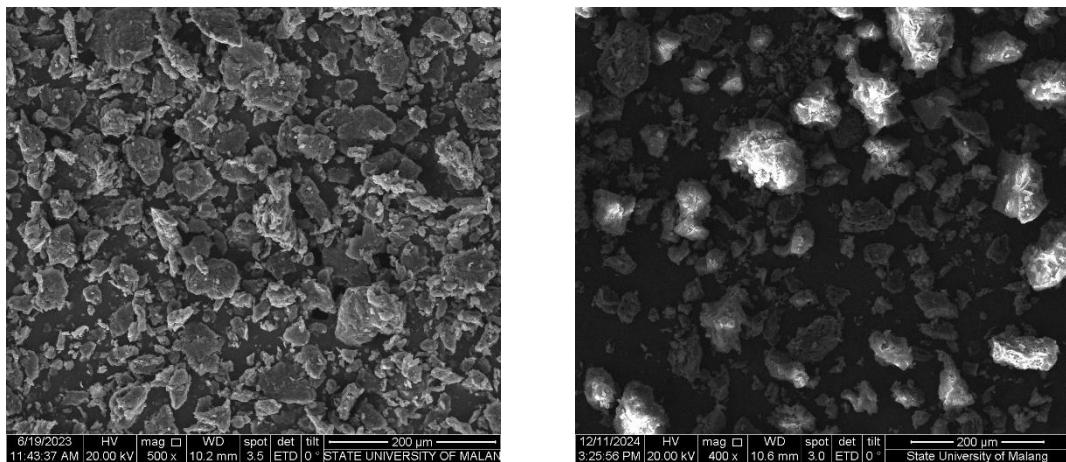


Gambar 3. Gugus Fungsi GO dan GO-SiO₂

Spektrum FTIR menunjukkan puncak lebar O-H pada daerah 3200–3600 cm⁻¹ dikaitkan dengan pembentukan gugus hidroksil dan karboksil dari GO (Chen et al., 2015). Pada GO, puncak di 1713 cm⁻¹ menandakan stretching C=O dari gugus karboksil, sementara puncak di 1637 cm⁻¹ dikaitkan dengan gugus C=O. Setelah modifikasi dengan SiO₂, puncak C=O relatif melemah atau bergeser, menandakan interaksi kimiawi antara gugus silanol dan karboksil GO. Kehadiran puncak di rentang 1100–1050 cm⁻¹ mengonfirmasi sintesis komposit, di mana getaran asymmetric Si-O-Si dan C-O-C muncul akibat ikatan siloksan dan epoxy/glycosidic antara GO dan nanopartikel silika. Lebih lanjut, puncak di 947 cm⁻¹ merepresentasikan stretching gugus Si-OH (silanol), sedangkan puncak simetris Si-O-Si muncul di 803 cm⁻¹, menunjukkan terbentuknya jaringan silika amorf. Kombinasi intensitas dan keberadaan jalur getaran ini membuktikan bahwa silika telah berhasil di-graft ke permukaan GO tanpa menghilangkan sepenuhnya gugus fungsional yang asli. Penurunan intensitas puncak C=O dan perubahan bentuk O-H serta munculnya getaran baru menunjukkan sintesis GO-SiO₂ yang berhasil dengan pembentukan ikatan siloxane antara kedua material. Secara keseluruhan, spektrum FTIR menyajikan bukti kuat mengenai modifikasi kimiawi yang menghasilkan struktur komposit fungsional berbasis interaksi gugus oksigen dan silanol.

C. Analisa Data SEM-EDX

Analisis SEM-EDX digunakan untuk mengamati morfologi permukaan serta mengidentifikasi unsur penyusun material guna menilai keberhasilan sintesis dan modifikasi. Pada Gambar 4 terlihat bahwa GO memiliki struktur lamelar dengan agregat tidak beraturan dan permukaan berkerut akibat keberadaan gugus oksigen, menunjukkan bahwa proses oksidasi berjalan dengan baik. Selain itu, ukuran dari GO juga lebih kecil dan tidak seragam. Setelah dimodifikasi dengan SiO₂ menjadi GO-SiO₂, lembaran GO tampak tertutupi nanopartikel silika berbentuk hampir sferis yang tersebar pada permukaan, meskipun beberapa area masih mengalami aglomerasi. Partikel SiO₂ bertindak sebagai agen penguat yang meningkatkan dispersi dan mengurangi agregasi, sehingga meningkatkan kohesi antarmuka senyawa (Ahmed & Al-Bermany, 2025). Aglomerasi tersebut terjadi karena proses sonikasi yang kurang optimal, sehingga distribusi partikel tidak sepenuhnya merata. Hal tersebut juga di dukung penelitian oleh (Angesti & Munasir, 2021).



Gambar 4. Hasil Karakterisasi SEM (a) GO; (b) GO-SiO₂

Karakterisasi EDX dilakukan guna mengidentifikasi unsur penyusun material dan memastikan keberhasilan modifikasi GO oleh SiO₂. Berdasarkan Tabel 1, sampel GO menunjukkan dominasi unsur karbon sebesar 77,3% dan oksigen sebesar 22,5%, yang sesuai dengan karakteristik GO hasil oksidasi. Pada sampel GO-SiO₂, kandungan karbon menurun menjadi 67,1%, sementara oksigen meningkat menjadi 29,3% yang mengindikasikan adanya penambahan gugus oksigen dari pembentukan struktur silika. Selain itu, munculnya unsur silikon sebesar 3,6% pada sampel GO-SiO₂ menjadi bukti kuat bahwa nanopartikel SiO₂ berhasil terdepositi pada permukaan GO. Peningkatan komposisi oksigen dan kehadiran silikon tersebut selaras dengan hasil SEM yang menunjukkan adanya partikel silika yang menempel pada

lembaran GO. Dengan demikian, data EDX mengonfirmasi bahwa proses modifikasi GO menggunakan TEOS berhasil menghasilkan komposit GO-SiO₂ dengan perubahan komposisi unsur yang signifikan.

Tabel 1. Komposisi Unsur (Atomic) EDX

No	Sampel	C (%)	O (%)	Si (%)
1	GO	77.3	22.5	0.0
2	GO-SiO ₂	67.1	29.3	3.6

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Penelitian ini berhasil mensintesis dan mengkarakterisasi *graphene oxide* (GO) yang dimodifikasi dengan nanopartikel silika (SiO₂) berbasis limbah cangkang kelapa sawit. Aktivasi karbon dari limbah sawit menghasilkan karbon aktif yang digunakan sebagai prekursor pembuatan GO melalui metode Hummers termodifikasi. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan pergeseran sudut 2θ dari 24,2° pada GO menjadi 23,8° pada komposit GO-SiO₂, yang mengindikasikan peningkatan jarak antar bidang dari 3,67 Å menjadi 3,73 Å serta penurunan ukuran kristalit dari 3,7 nm menjadi 3,5 nm, akibat interkalasi dan interaksi kimia dengan nanopartikel silika. Spektrum FTIR juga menunjukkan keberhasilan pembentukan komposit, ditandai dengan munculnya vibrasi khas gugus Si-O-Si dan Si-OH pada 1100–800 cm⁻¹, serta penurunan intensitas gugus C=O dan O-H yang mengindikasikan interaksi kimia antara GO dan SiO₂. Temuan ini menguatkan bahwa sintesis komposit GO-SiO₂ berhasil dilakukan dan menunjukkan struktur fungsional yang sesuai untuk aplikasi lanjutan. Dengan demikian, limbah cangkang kelapa sawit tidak hanya memiliki potensi sebagai sumber karbon alternatif, tetapi juga dapat dikembangkan menjadi material komposit ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi.

B. Saran

Penelitian ini menunjukkan potensi besar pemanfaatan limbah cangkang kelapa sawit sebagai sumber karbon aktif dalam sintesis GO dan pengembangan komposit GO-SiO₂. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan lebih teliti dan memperhatikan hal-hal kecil seperti pencucian material pada PH netral agar didapatkan hasil yang maksimal. Selain itu, diharapkan dapat melakukan pengujian sifat fungsional material seperti aktivitas antibakteri, kapasitas adsorpsi logam berat, atau konduktivitas listrik untuk memperluas potensi aplikatif komposit yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S. J., & Al-Bermany, E. (2025). Performance SiO₂, GO, and SiO₂@GO nanomaterials on fabricating new polymer nanocomposites for optical, antibacterial, and anticancer applications. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 15(1). <https://doi.org/10.1007/s13204-024-03080-9>
- Alam, S. N., Sharma, N., & Kumar, L. (2017). Synthesis of Graphene Oxide (GO) by Modified Hummers Method and Its Thermal Reduction to Obtain Reduced Graphene Oxide (rGO)*. *Graphene*, 06(01), 1-18. <https://doi.org/10.4236/graphene.2017.61001>
- Angesti, W., & Munasir, M. (2021). Fabrication and Characterization of Polysulfone Membrane Based On GO-SiO₂ Composite using Phase Inversion Method. *E3S Web of Conferences*, 328. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132801010>
- Chen, J., Li, Y., Huang, L., Li, C., & Shi, G. (2015). High-yield preparation of graphene oxide from small graphite flakes via an improved Hummers method with a simple purification process. *Carbon*, 81(1), 826-834. <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2014.10.033>
- Guerrero-Contreras, J., & Caballero-Briones, F. (2015). Graphene oxide powders with different oxidation degree, prepared by synthesis variations of the Hummers method. *Materials Chemistry and Physics*, 153, 209-220. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2015.01.005>
- Jasri, K., Abdulhameed, A. S., Jawad, A. H., ALOthman, Z. A., Yousef, T. A., & Al Duaij, O. K. (2023). Mesoporous activated carbon produced from mixed wastes of oil palm frond and palm kernel shell using microwave radiation-assisted K₂CO₃ activation for methylene blue dye removal: Optimization by response surface methodology. *Diamond and Related Materials*, 131, 109581. <https://doi.org/10.1016/J.DIAMOND.2022.109581>

- Khanmohammadi, A., Rashidi, V., & Sadighian, S. (2023). Reduced Graphene Oxide/Silica Nanocomposite as Anticancer Drug Delivery Nanocarrier. *Biointerface Research in Applied Chemistry*, 13(4). <https://doi.org/10.33263/BRIAC134.383>
- Li, R., Zhou, Q., Bi, Y., Cao, S., Xia, X., Yang, A., Li, S., & Xiao, X. (2021). Research progress of flexible capacitive pressure sensor for sensitivity enhancement approaches. In *Sensors and Actuators, A: Physical* (Vol. 321). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112425>
- Liu, Y., Zhang, F., Zhu, W., Su, D., Sang, Z., Yan , X., Li, S., Liang, J., & Dou, S. X. (2020). A multifunctional hierarchical porous SiO₂/GO membrane for high efficiency oil/water separation and dye removal. *Carbon*, 160, 88–97. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.01.002>
- Mahat, N. A., & Shamsudin, S. A. (2020). Blue luminescence carbon quantum dots derived from oil palm empty fruit bunch biomass. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 736(5). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/736/5/052001>
- Nayak, P. K. (2016). *Recent Advances in Graphene Research*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/61909>
- Theodorakis, N., Saravanou, S. F., Kouli, N. P., Iatridi, Z., & Tsitsilianis, C. (2021). Ph/thermo-responsive grafted alginate-based sio₂ hybrid nanocarrier/hydrogel drug delivery systems. *Polymers*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/polym13081228>
- Zainal, N. H., Zainal, B. S., Wahab, N. A., Jalani, N. F., & Ibrahim, M. F. (2025). Enhancing POME final discharge treatment efficiency using oil palm kernel shell activated carbon: A pilot and field-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 506. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.145490>