

SINTESIS DAN KARAKTERISASI REDUCED GRAPHENE OXIDE DARI CANGKANG SAWIT TERMODIFIKASI SILIKA

¹⁾Mohamad Fikri Aliansah, ²⁾Munasir

¹⁾ Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Surabaya, email: mohamadfikri.21008@mhs.unesa.ac.id

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

Abstrak

Penelitian ini melaporkan hasil sintesis reduced graphene oxide (rGO) yang dimodifikasi silika (SiO_2) dari bahan alam; rGO dibuat dari cangkang inti sawit menggunakan metode hummer kemudian dilapisi dengan SiO_2 dari prekursor TEOS menggunakan metode sol-gel dan direduksi menggunakan metode hidrotermal-hidrazin. Analisis XRD menunjukkan bahwa rGO cangkang inti sawit yang dimodifikasi SiO_2 menunjukkan pergeseran kisi yang disebabkan oleh penjangkaran SiO_2 pada struktur grafen yang konsisten dengan hasil SEM/EDX. Pengamatan FTIR menunjukkan bahwa SiO_2 telah terbentuk pada rGO dengan adanya gugus Si-O-C dan Si-OH serta reduksi gugus OH yang menunjukkan bahwa proses modifikasi rGO terjadi melalui ikatan hidrogen. Pada pengamatan konduktivitas sampel, sampel rGO memiliki konduktivitas sebesar $23,65 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ sedangkan sampel rGO@ SiO_2 memiliki konduktivitas sebesar $16,71 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ dimana terjadi penurunan konduktivitas yang disebabkan oleh sifat intrinsik SiO_2 yang bersifat isolator.

Kata Kunci: rGO@ SiO_2 , Cangkang Sawit, Metode Sol-Gel

Abstract

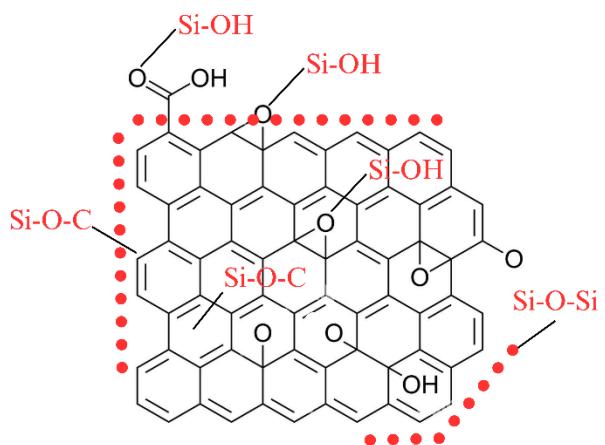
This work reports the results of the synthesis of silica (SiO_2)-modified reduced graphene oxide (rGO) from natural materials; rGO was made from palm kernel shells using the hummer method then coated with SiO_2 from TEOS precursor using the sol-gel method and reduced using hydrothermal-hydrazine. XRD analysis showed that SiO_2 -modified palm kernel shell rGO exhibited red shift caused by SiO_2 anchoring on the graphene structure which was consistent with the SEM/EDX results. FTIR observations showed that SiO_2 had formed on rGO with the presence of Si-O-C and Si-OH groups and a reduction in OH groups indicating that the rGO modification process was through hydrogen bonds. In the observation of sample conductivity, the rGO sample had a conductivity of $23.65 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ while the rGO@ SiO_2 sample had a conductivity of $16.71 \times 10^{-2} \text{ S/m}$ where there was a decrease in conductivity caused by the intrinsic nature of SiO_2 which was very insulating.

Keywords: rGO@ SiO_2 , Palm Kernel Shell, Sol-Gel Method

I. PENDAHULUAN

rGO merupakan material yang memiliki kerangka dua dimensi dengan struktur heksagonal dari lapisan monomolekul tunggal atom karbon hibridisasi sp^2 (Sujiono et al., 2020). Struktur dua dimensi ini menyebabkan reduced Graphene Oxide (rGO) memiliki luas permukaan dengan spesifik yang tinggi, fleksibilitas, dan konduktivitas yang sangat baik (Putri & Supardi, 2023). Sehingga aplikasi dari material ini sangatlah luas terutama pada bidang yang memerlukan material konduktif sebagai filler pada polimer seperti bio-sensor dan baterai (Nie et al., 2019)(Chu et al., 2023). Selain itu, rGO sebagai filler polimer juga berperan penting pada bidang plester luka dan anti-bakteri (Khodaee et al., 2023)(Hanif et al., 2021). Baru-baru ini, para peneliti melakukan penelitian berbasis pemanfaatan limbah seperti limbah bio-massa cangkang sawit yang dimanfaatkan sebagai karbon aktif, yaitu prekursor pembuatan rGO. Dilaporkan oleh (Saleh et al., 2023) bahwa karbon aktif yang disintesis dari cangkang sawit menghasilkan kadar karbon terikat 73,5%. Sedangkan pada penelitian (Faaizatunnisa et al., 2025) berhasil mensintesis rGO dari cangkang sawit menggunakan metode hummer untuk menoksidasi karbon aktif lalu direduksi menggunakan DMF.

Meski memiliki kemampuan yang sangat dibutuhkan dalam komposit berbasis polimer, rGO memiliki interaksi ikatan yang buruk dengan matriksnya akibat sifatnya yang sulit berikatan mengakibatkan posisi sering berpindah atau slip sehingga persebaran filler tidak merata atau menggumpal disuatu sisi (Khodaee et al., 2023)(Zhou et al., 2022). Untuk menutupi kekurangan tersebut maka rGO perlu dimodifikasi dengan material yang mampu menciptakan ikatan yang baik dengan matriks (Hanif et al., 2021). Sehingga kami memilih silika sebagai agent modifikasi untuk menciptakan suatu lapisan pada rGO yang memiliki interaksi baik dengan matriks melalui ikatan hidrogen karena terdapat gugus silanol pada permukaan silika (Pingan et al., 2017)(Sadroddini & Razzaghi-Kashani, 2020). Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi material meliputi XRD, FTIR, SEM-EDX, dan Konduktivitas yang diharapkan dapat menjadi sumber informasi di masa mendatang mengenai silika sebagai agen modifikasi rGO khususnya untuk rGO berbasis biomassa.



Gambar 1. rGO@SiO₂

II. METODE

A. Bahan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini: Cangkang sawit (Dura), Natrium Hidroksida (NaOH) Sigma Aldrich, Kalium Permanganat (KMnO₄) SAP Chemicals, Sodium Nitrate (NaNO₃) Sigma Aldrich, Asam Sulfat 97% (H₂SO₄) Honeywell, Aquadest, Larutan Hidrogen Peroksida 30% (H₂O₂) SMART-LAB, Tetraethyl Ortosilicate (TEOS) Sigma Aldrich, Ethanol Absolut Sigma Aldrich, Larutan Hydrazine Hydrate w/w 80% Sigma Aldrich, Dimethyl Formamide (DMF) Sigma Aldrich.

B. Metode Sintesis

Sintesis GO cangkang sawit dilakukan dengan metode hummer yang dimodifikasi mengikuti penelitian (Faaizatunnisa et al., 2025). Selanjutnya untuk mensintesis $\text{GO}@\text{SiO}_2$ digunakan metode sol-gel dengan menambahkan larutan Etanol-TEOS dengan komposisi 0,5 gram TEOS dan 2,5 gram etanol ke dalam larutan GO-Etanol-Air dengan komposisi 0,1 gram GO, 20 gram Etanol, dan 5 gram air. Selanjutnya larutan campuran tersebut diaduk pada suhu ruang selama 15 menit kemudian ditambahkan ammonia sebanyak 0,36 gram yang selanjutnya diaduk selama 18 jam. Reduksi dengan metode hidrothermal-hidrazin dilakukan dengan mendispersikan 0,18 gram $\text{GO}@\text{SiO}_2$ ke dalam 56,5 gram DMF. Kemudian larutan dimasukkan ke dalam Autoclave dan ditambahkan 0,27 gram hidrazin. Selanjutnya autoklaf dipanaskan pada suhu 180°C selama 12 jam untuk mendapatkan rGO termodifikasi silika ($\text{rGO}@\text{SiO}_2$).

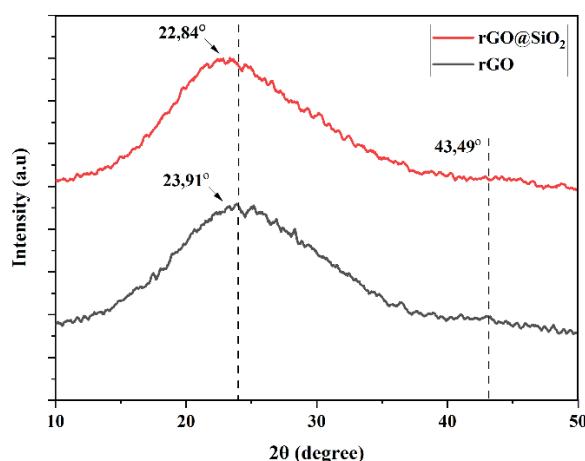
C. Teknik Pengumpulan Data

Perubahan struktur graphene diamati menggunakan instrumen Difraksi Sinar-X (pada Difraktometer XPert MPD dengan radioasi $\text{CuK}\alpha$, $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$) pada kisaran $2\theta 5^\circ$ - 80° pada suhu kamar. Ikatan struktur dan gugus fungsi diselidiki dengan Spektroskopi Inframerah Transformasi Fourier (FTIR) menggunakan instrumentasi IR Prestige21 tipe Shimadzu (Kyoto, Jepang) pada daerah inframerah 4000 hingga 400 cm^{-1} . Analisis SEM-EDX menggunakan instrumentasi FEI Inspect-S50. Konduktivitas sampel diukur menggunakan meter LCR SANWA 700 pada frekuensi 1 MHz dengan dimensi sampel berdiameter 1 cm.

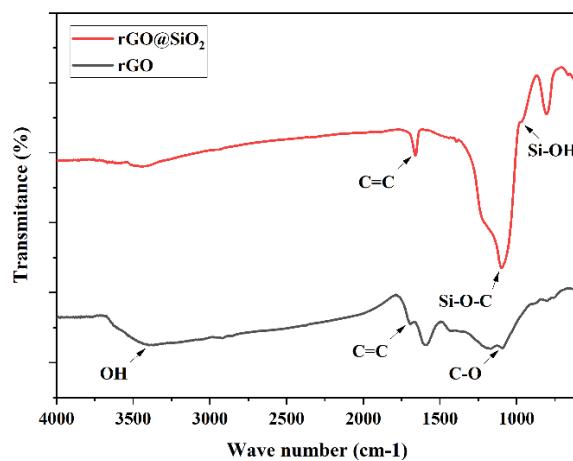
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. XRD dan FTIR

Pada Gambar 2, terdapat puncak dominan pada $23,91^\circ$ (002) dengan rata-rata d-spacing pada sampel sebesar $0,371 \text{ nm}$ (persamaan Bragg). Lebar d-spacing yang kecil mengindikasikan bahwa sebagian oksidasi pada struktur telah tereduksi dengan baik dan lapisan rGO sangat tipis akibat laju pengelupasan yang tinggi (Sharma et al., 2017)(Poulomi Das et al., 2024). Puncak 2 Theta sebesar $43,19^\circ$ (100) yang lemah pada sampel tereduksi mengindikasikan adanya reduksi domain karbon reguler akibat proses reduksi hidrotermal yang menimbulkan lubang pada saat penghilangan gugus oksida (Ruidíaz-Martínez et al., 2020)(Papari Das et al., 2021). Puncak yang lebar pada bidang 002 dan 100 mengindikasikan terbentuknya oksida grafen tereduksi amorf (Sujiono et al., 2020). Sementara itu, rGO yang dimodifikasi dengan SiO_2 mengalami pergeseran kristal (interkalasi) hingga $22,84^\circ$. Hal ini menunjukkan adanya pelebaran jarak-d dari $0,371 \text{ nm}$ menjadi $0,386 \text{ nm}$ dengan penambahan silika, yang menunjukkan bahwa silika terbentuk dengan baik dalam rGO dan selanjutnya dianalisis menggunakan FTIR dan SEM-EDX. Pengurangan puncak 100 dalam sampel yang dimodifikasi dapat dikaitkan dengan penjanganan bahan isolasi dalam struktur karbon yang dianggap sebagai cacat (Ruidíaz-Martínez et al., 2020).



Gambar 2. Spectrum XRD



Gambar 3. Spectrum FTIR

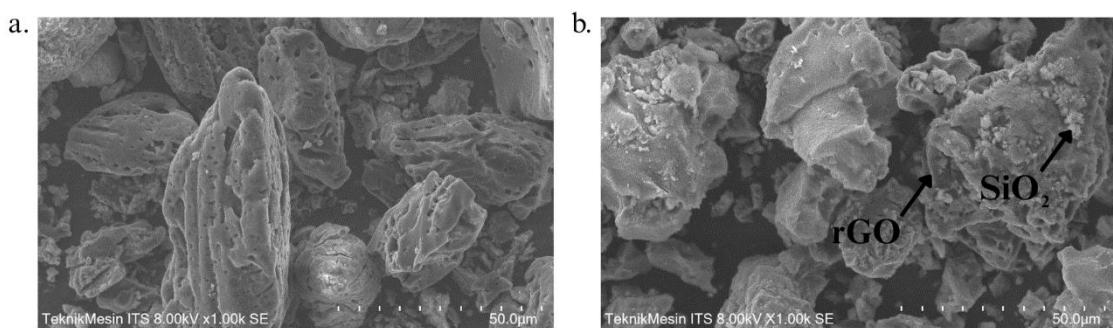
Tabel 1. Gugus Fungsi Material

No	Wavenumber	Gugus	Refrensi	
			Wavenumber	Penelitian Sebelumnya
1	3426	OH	3400	(Romero et al., 2018)
2	1653	C=C	1623	(Poulomi Das et al., 2024)
3	1084	C-O	1100	(Romero et al., 2018)
4	1618	C=C	1623	(Poulomi Das et al., 2024)
5	1095	Si-O-C	1088	(Sadroddini & Razzaghi-Kashani, 2020)
6	955	Si-OH	956	(Li et al., 2019)

Gambar 2 menunjukkan spektrum serapan dominan pada 3426 cm^{-1} adalah peregangan -OH yang disebabkan oleh molekul air yang terperangkap di bagian luar sampel, serapan pada 1620 cm^{-1} adalah getaran kerangka domain graphene reguler C=C, dan serapan pada 1080 cm^{-1} adalah getaran gugus epoksi C-O. Setelah direaksikan dengan TEOS, puncak serapan pada 3400 cm^{-1} menurun drastis, yang menunjukkan bahwa material tersebut terikat melalui ikatan hidrogen (Sadroddini & Razzaghi-Kashani, 2020). Dalam penyerapan rGO C=C yang khas, sangat jelas dengan sedikit pergeseran, dan penyerapan di sekitarnya menurun drastis, yang dikaitkan dengan pembentukan ikatan baru. Terdapat puncak baru yang sangat dominan pada 1095 cm^{-1} yang merupakan daerah spektrum yang terkait dengan Si dan ikatan-ikatannya yang menyertainya dengan vibrasi peregangan asimetris Si-O-Si/Si-O-C, pada 956 cm^{-1} merupakan vibrasi peregangan karakteristik Si-O dalam gugus Si-O-H (pita Si-OH), yang disebabkan oleh vibrasi asimetris gugus Si-OH. Peningkatan pita ini terkait dengan peningkatan gugus -OH yang terletak pada permukaan silika yang terpolimerisasi. Pita serapan -OH menurun drastis yang menunjukkan pembentukan rGO@SiO₂ melalui ikatan hidrogen.

B. SEM-EDX dan KONDUKTIVITAS

Analisis SEM digunakan untuk mengetahui morfologi permukaan dari sampel yang disintesis. Dapat dilihat pada Gambar 3 (a) bahwa sampel rGO memiliki bentuk seperti gumpalan dengan pori-pori yang seragam. Sampel rGO dari cangkang sawit memiliki permukaan yang seragam dan halus dengan sedikit cacat permukaan. Yang menunjukkan keberhasilan proses konversi dari biomassa menjadi rGO dengan pengelupasan lapisan yang tinggi (Irwan et al., 2025). Pada sampel rGO yang dimodifikasi dengan silika, Gambar 3 (b) menunjukkan distribusi silika yang luas dimana silika terbentuk dengan baik pada permukaan rGO. Analisis menggunakan EDX digunakan untuk mengetahui komposisi dari sampel yang disintesis. Pada tabel 3, sampel rGO memiliki rasio C/O sebesar 10,87 yang menunjukkan bahwa sampel rGO memiliki sedikit gugus oksida dan dapat dibandingkan dengan penelitian sebelumnya (Romero et al., 2018)(Papari Das et al., 2021). Selain itu, pada sampel komposit, dapat dilihat bahwa kandungan silika lebih dominan daripada karbon, yang menunjukkan keberhasilan sintesis rGO cangkang sawit yang dimodifikasi silika.

**Gambar 3.** SEM (a) rGO and (b) rGO@SiO₂

Tabel 2. Komposisi Unsur (Atomic) EDX dan Konduktivitas

No	Sampel	C (%)	O (%)	Si (%)	C/O	σ (S/m)
1	rGO	90,94	8,36	-	10,87	$23,65 \times 10^{-2}$
2	rGO@SiO ₂	29,13	48,69	22,18	-	$16,71 \times 10^{-2}$

Pada Tabel 2, sampel rGO memiliki konduktivitas sebesar $23,65 \times 10^{-2}$ S/m. Rasio C/O yang tinggi berarti terdapat sedikit oksida pada struktur karbon. Semakin banyak gugus oksigen yang berhasil dihilangkan, semakin tinggi konduktivitas dan stabilitas listriknya (Öztek et al., 2025)(Liu & Speranza, 2021). Sampel rGO@SiO₂ memiliki konduktivitas sebesar $16,71 \times 10^{-2}$ S/m. Meskipun rGO secara individual menunjukkan konduktivitas yang tinggi, penjangkaran partikel silika (SiO₂) pada permukaan atau di antara lapisan grafena dapat mengurangi konduktivitas listrik total sistem komposit rGO@SiO₂. Hal ini disebabkan oleh sifat intrinsik SiO₂ yang sangat isolator sehingga ketika partikel silika terdistribusi pada jaringan grafena, akan mengganggu jalur konduktif sp² (Sadreddini & Razzaghi-Kashani, 2020).

C. Study Potensi

seperti yang disinggung sebelumnya terkait distribusi rGO yang tidak merata pada matriks menjadi kelemahan dari material rGO. Penambahan silika bertujuan untuk menciptakan lapisan rGO yang dapat berikatan baik dengan matriksnya (Jiang et al., 2023). Pada kasus ini, silika menyumbang sebagian besar gugus hidrosil dari silanol dan ikatan OH lainnya pada bagian luar rGO sehingga berikatan melalui ikatan OH. Berdasarkan penjelasan (Sadreddini & Razzaghi-Kashani, 2020) bahwa gugus OH pada karakterisasi FTIR GO pada area serapan 3400 mengalami pengurangan yang sangat signifikan yang menandakan terjadinya ikatan silang antara graphene dengan silika. Yang membentuk ikatan baru dengan pencangkokan silika pada struktur graphene yang menghasilkan ikatan Si-O-C (Jiang et al., 2023), pada penelitian (Jiang et al., 2023), silika dicangkokan pada GO untuk memperbaiki kemampuan dispersinya pada PLA agar tidak teraglomerasi pada suatu bagian polimer. Hasilnya, masalah aglomerasi GO yang parah pada PLA membaik setelah modifikasi menunjukkan peningkatan yang baik pada beberapa sifat PLA. Setelah modifikasi dengan silika, jarak lamelar GO-SiO₂ lebih besar daripada GO dan merupakan jenis pengisi yang terdispersi dengan baik dalam PLA. Selain itu, partikel SiO₂ yang dicangkokan pada permukaan GO juga dapat meningkatkan jalur difusi dan kelengkungan gas dalam PLA, mengurangi koefisien difusi, sehingga meningkatkan sifat penghalang PLA.

rGO merupakan material konduktif yang umum digunakan dalam beragam aplikasi seperti sensor, superkapasitor, dan bidang lainnya (Dwiana et al., 2025)(Munasir et al., 2025). Meski secara hasil eksperimen silika merusak jalur konduktivitas dari rGO, namun berdasarkan beragam sumber study silika mampu memberikan improvisasi terhadap sifat rGO. Pada penelitian (Sadreddini & Razzaghi-Kashani, 2020) melaporkan bahwa PDMS/rGO@SiO₂ memiliki kekuatan tembus dielektrik yang lebih tinggi daripada komposit PDMS/rGO. Hal ini membuktikan efek positif pelapisan silika dalam meningkatkan kekuatan tembus dielektrik komposit. karena kepadatan cangkang silika yang lebih tinggi. Secara umum, peningkatan kekuatan tembus dielektrik pada komposit PDMS/rGO@SiO₂ dapat dikaitkan dengan faktor-faktor berikut karena adanya cangkang silika: pengurangan arus bocor dan rugi dielektrik yang efektif, penurunan intensitas medan listrik nominal yang terkonsentrasi di dalam matriks, pengurangan arus tunneling diseluruh matriks. Sebagaimana ditunjukkan pada hasil penelitian tersebut, kekuatan tembus dielektrik menurun seiring dengan peningkatan konduktivitas listrik pada material. Faktanya, penurunan kekuatan tembus dielektrik dapat dianggap sebagai peningkatan pembawa muatan dalam komposit yang pada akhirnya menyebabkan kegagalan komposit akibat kerusakan listrik avalanche. Lalu pada penelitian (Namsar et al., 2022) melaporkan bahwa anoda berbasis SiO₂/grafena menunjukkan kinerja elektrokimia yang luar biasa, yaitu kapasitas spesifik 385,48 mAh g⁻¹, kerapatan arus 288,7 mA g⁻¹, dan coulombic efficiency 98,08% dengan stabilitas siklus yang sangat baik dibandingkan dengan elektroda N-GO murni. Kapasitas tinggi komposit rGO dimodifikasi silika dapat dijelaskan oleh kontribusi SiO₂ dalam komposit. Karena kapasitas teoritis SiO₂ cukup tinggi, hal ini dapat meningkatkan kapasitas total nanokomposit berbasis SiO₂/grafena yang diperoleh. Terkait stabilitas siklus, selain SiO₂ menjadi penyangga lembaran tipis graphene yang lentur namun elastis serta partikel SiO₂

berukuran nano dapat dengan mudah melepaskan tekanan mekanis yang disebabkan oleh perubahan volume drastis yang terjadi selama proses litiasi/delitiasi elektrokimia berulang. Pada saat yang sama, sifat amorf nanopartikel SiO_2 memungkinkan difusivitas cepat karena jalur difusi yang pendek. Hal ini menyebabkan mereka menjadi sangat reaktif karena ion Li dapat dengan mudah diangkut melalui nanokomposit.

Pada bidang sensor, Secara umum, nanopartikel SiO_2 merupakan aditif yang ideal untuk memperkuat sifat mekanik material komposit meski penambahan nanopartikel SiO_2 selalu mengakibatkan penurunan konduktivitas listrik pada rGO akibat sifat silika yang isolatif (Zhao et al., 2019). Berdasarkan penelitian (Gao et al., 2019) terkait strain sensor dijelaskan bahwa nanopartikel SiO_2 pada grafena menurunkan energi permukaan sekaligus meningkatkan kekasaran permukaan, yang berkontribusi pada superhidrofobisitas komposit nanofiber yang dihasilkan sehingga lapisan konduktifnya dapat dipertahankan dari larutan asam, basa, dan garam selama pengaplikasian. Dari hasil yang didapatkan, strain sensor yang dihasilkan sensitivitas sebesar 5,9 yang dapat digunakan sebagai motion monitoring.

Dari study diatas, meski silika memberikan pengaruh terhadap pengurangan konduktivitas rGO secara signifikan, di sisi lain silika memberikan keunggulan sifat lain sehingga rGO memiliki kinerja yang lebih baik pada suatu aplikasi. Sehingga silika yang dicangkokan pada rGO memiliki potensi untuk beragam aplikasi dengan konsep serupa atau konbsep baru yang berhubungan dengan interaksi materiks filler atau sifat dielektrik dan mekanik komposit. Meski begitu perlu di ketahui bahwa rGO yang telah dibahas pada jurnal diatas untuk membuat komposit rGO termodifikasi silika disintesis dari grafit komersil yang memiliki nilai beli cukup mahal sekitar £ 32 untuk 25 gram. Sedangkan bahan baku rGO yang kami siapkan dari karbon aktif cangkang sawit hanya sekitar Rp 44.500 untuk 75 gram. Sehingga dari biaya bahan baku saja sangat terpaut beda. Di satu lain sisi penelitian terkait sintesis material advance berbasis bahan alam merupakan bentuk dukungan terhadap penelitian hijau untuk memanfaatkan limbah yang melimpah ruah dan kurang berharga menjadi suatu produk yang bernilai jual tinggi.

IV. PENUTUP

A. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa rGO dari cangkang sawit telah berhasil dimodifikasi menggunakan silika. Berdasarkan analisis menggunakan XRD menunjukkan bahwa rGO dari cangkang sawit yang dimodifikasi dengan silika menunjukkan adanya interkalasi yang disebabkan oleh penjangkaran silika pada struktur graphene yang sesuai dengan hasil SEM-EDX. Pengamatan menggunakan FTIR menunjukkan bahwa telah terbentuk silika pada rGO dengan adanya gugus Si-O-C dan Si-OH serta adanya reduksi pada gugus OH yang menunjukkan bahwa proses modifikasi rGO adalah melalui ikatan hidrogen. Pada pengamatan konduktivitas sampel, sampel rGO memiliki konduktivitas sebesar $23,65 \times 10^{-2}$ S/m sedangkan sampel rGO@ SiO_2 memiliki konduktivitas sebesar $16,71 \times 10^{-2}$ S/m dimana terjadi penurunan konduktivitas yang disebabkan oleh sifat intrinsik SiO_2 yang bersifat sangat isolator.

B. Saran

Penelitian selanjutnya diharapkan untuk memperhatikan dispersi GO pada air. Jika disperse GO tidak merata maka silika yang akan terbentuk hanya pada GO yang terdispersi. Untuk penelitian selanjutnya disarankan untuk mengaplikasikan material rGO@ SiO_2 pada sensor atau superkapasitor.

DAFTAR PUSTAKA

- Chu, Z., Zhao, X., Wang, Q., Bao, T., Li, H., Cao, Y., Zhang, B., Cao, J., & Si, W. (2023). *Preparation of a Flexible Reduced Graphene Oxide-Si Composite Film and Its Application in High-Performance Lithium Ion Batteries*.
- Das, Papari, Deoghare, A. B., & Ranjan, S. (2021). A Novel Approach to Synthesize Reduced Graphene Oxide (RGO) at Low Thermal Conditions. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 46(6), 5467-5475. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04956-y>
- Das, Poulobi, Ibrahim, S., Chakraborty, K., Ghosh, S., & Pal, T. (2024). Stepwise reduction of graphene oxide and studies on defect-controlled physical properties. *Scientific Reports*, 14(1), 1-10.

- https://doi.org/10.1038/s41598-023-51040-0
- Dwiana, W., Zaqqiyah, R., Yuliana, E. S., Wibowo, S. R., Harly, M., Sunaryono, S., Amrillah, T., Aziz, M., & Mufti, N. (2025). Simple synthesis of reduced graphene oxide (rGO) from lignite via controlled carbonization temperature for energy storage electrodes. *Kuwait Journal of Science*, 52(3). <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2025.100417>
- Faaizatunnisa, N., Ediati, R., Yusof, E. N. M. D., Fadlan, A., Karelius, K., Kulsum, U., & Ariesta, M. N. (2025). Optimized photocatalytic degradation of 2-naphthol using ZnO/rGO nanocomposites synthesized from palm kernel shell waste. *Journal of Water Process Engineering*, 70, 106977.
- Gao, J., Li, B., Huang, X., Wang, L., Lin, L., Wang, H., & Xue, H. (2019). Electrically conductive and fluorine free superhydrophobic strain sensors based on SiO₂/graphene-decorated electrospun nanofibers for human motion monitoring. *Chemical Engineering Journal*, 373, 298–306. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.05.045>
- Hanif, W., Hardiansyah, A., Randy, A., & Asri, L. A. T. W. (2021). Physically crosslinked PVA/graphene-based materials/aloe vera hydrogel with antibacterial activity. *RSC Advances*, 11(46), 29029–29041. <https://doi.org/10.1039/d1ra04992e>
- Irwan, I., Rahmin, R., Dali, N., Nohong, N., Ratna, R., Azis, T., Alimin, A., & Muzakkar, M. Z. (2025). Synthesis and Characteristics Of Graphene Oxide (GO) from the Skin Shell: Candlenut, Palm Oil and Coconut Hybrids. *Letters in Applied NanoBioScience*, 14(2), 1–9. <https://doi.org/10.33263/LIANBS142.094>
- Jiang, W., Sun, C., Zhang, Y., Xie, Z., Zhou, J., Kang, J., Cao, Y., & Xiang, M. (2023). Preparation of well dispersed graphene oxide-silica nanohybrids/ poly(lactic acid) composites by melt mixing. *Polymer Testing*, 118(December 2022), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107912>
- Khodaei, Z., Mazinani, S., & Sharif, F. (2023). Reduced graphene oxide-modified polyvinyl alcohol hydrogel with potential application as skin wound dressings. *Journal of Polymer Research*, 30(1). <https://doi.org/10.1007/s10965-022-03384-w>
- Li, C., Zhu, J., Zhou, M., Zhang, S., & He, X. (2019). Investigation on water vapor adsorption of silica-phosphonium ionic liquids hybrid material. *Materials*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/ma12111782>
- Liu, W., & Speranza, G. (2021). Tuning the Oxygen Content of Reduced Graphene Oxide and Effects on Its Properties. *ACS Omega*, 6(9), 6195–6205. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05578>
- Munasir, Prapanca, A., Aliansah, M. F., Paramudhita, F. A., Faaizatunnisa, N., Ariesta, M. N., & Taufiq, A. (2025). Self-Healing Graphene-Based Composite Hydrogels for Motion Sensing: Source, Fabrication, and Applications in Assistive Technologies - A Review. *Sensors International*, 124250. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sintl.2025.100338>
- Namsar, O., Autthawong, T., Boonprachai, R., Yu, A., & Sarakonsri, T. (2022). Enhancement in lithium storage performances of SiO₂/graphene-based nanocomposites prepared by low cost and facile approach. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(9), 6536–6548. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-07828-3>
- Nie, M., Xia, Y. han, & Yang, H. shan. (2019). A flexible and highly sensitive graphene-based strain sensor for structural health monitoring. *Cluster Computing*, 22(s4), 8217–8224. <https://doi.org/10.1007/s10586-018-1727-9>
- Öztekin, D., Arbağ, H., & Yaşıyerli, S. (2025). Preparation of RGO with Enhanced Electrical Conductivity: Effects of Sequential Reductions of L-Ascorbic Acid and Thermal. *Arabian Journal for Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s13369-024-09915-5>
- Pingan, H., Mengjun, J., Yanyan, Z., & Ling, H. (2017). RSC Advances transparency , thermostability and mechanical. 2450–2459. <https://doi.org/10.1039/c6ra25579e>
- Putri, N. A., & Supardi, Z. A. I. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Alam Tempurung Kelapa. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12(2), 47–55. <https://doi.org/10.26740/ifi.v12n2.p47-55>
- Romero, A., Lavin-Lopez, M. P., Sanchez-Silva, L., Valverde, J. L., & Paton-Carrero, A. (2018). Comparative study of different scalable routes to synthesize graphene oxide and reduced graphene oxide. *Materials Chemistry and Physics*, 203, 284–292. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2017.10.013>
- Ruidíaz-Martínez, M., Álvarez, M. A., López-Ramón, M. V., Cruz-Quesada, G., Rivera-Utrilla, J., & Sánchez-Polo, M. (2020). Hydrothermal synthesis of RGO-TiO₂ composites as high-performance UV photocatalysts for ethylparaben degradation. *Catalysts*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/catal10050520>
- Sadroddini, M., & Razzaghi-Kashani, M. (2020). Silica-decorated reduced graphene oxide (SiO₂@rGO) as hybrid fillers for enhanced dielectric and actuation behavior of polydimethylsiloxane composites. *Smart Materials and Structures*, 29(1). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab57e8>
- Saleh, M., Doi, J., & Pasae, Y. (2023). Pembuatan Arang Aktif dari Cangkang Kelapa Sawit, Tempurung Kelapa,

- dan Cangkang Kakao dengan Proses Torefaksi. *Chem Engineering Journal*, 1(1), 1-15.
- Sharma, V., Jain, Y., Kumari, M., Gupta, R., Sharma, S. K., & Sachdev, K. (2017). Synthesis and Characterization of Graphene Oxide (GO) and Reduced Graphene Oxide (rGO) for Gas Sensing Application. *Macromolecular Symposia*, 376(1), 1-5. <https://doi.org/10.1002/masy.201700006>
- Sujiono, E. H., Zurnansyah, Zabrian, D., Dahlan, M. Y., Amin, B. D., Samnur, & Agus, J. (2020). Graphene oxide based coconut shell waste: synthesis by modified Hummers method and characterization. *Helijon*, 6(8), e04568. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04568>
- Zhao, B., Sun, T., Zhou, X., Liu, X., Li, X., Zhou, K., Dong, L., & Wei, D. (2019). Three-dimensional graphene composite containing graphene-SiO₂ nanoballs and its potential application in stress sensors. *Nanomaterials*, 9(3), 1-11. <https://doi.org/10.3390/nano9030438>
- Zhou, J., Long, X., Huang, J., Jiang, C., Zhuo, F., Guo, C., Li, H., Fu, Y. Q., & Duan, H. (2022). Multiscale and hierarchical wrinkle enhanced graphene/Ecoflex sensors integrated with human-machine interfaces and cloud-platform. *npj Flexible Electronics*, 6(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41528-022-00189-1>