



Karakterisasi FTIR Arang Limbah Sawit untuk Menilai Potensi Prekursor Komposit rGO-Fe₃O₄ pada Aplikasi Sensor Magnetik Geofisika

Rahmad Oktafiansyah^{1*}, Totok Wianto², Maya Safitri³, M. Ikhwan Najmi⁴, Maulanie Muhaemina⁵, Muhammad Eizi Nugroho⁶

^{1,2,3,4,5,6} Program Studi Fisika, Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, Indonesia .

DOI: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i3.1213>

Article Info

Received: 01 July 2025

Revised: 30 July 2025

Accepted: 25 Agustus 2025

Correspondence:

Phone: +62815-5357-6981

Abstract: Pemanfaatan limbah biomassa kelapa sawit sebagai bahan baku material fungsional berpotensi memberikan solusi berkelanjutan dalam pengelolaan limbah dan pengembangan teknologi sensor. Penelitian ini bertujuan untuk mengkarakterisasi gugus fungsi permukaan dari arang cangkang, tandan kosong, dan campuran keduanya melalui spektroskopi FTIR, guna mengevaluasi kelayakannya sebagai prekursor dalam sintesis komposit reduced Graphene Oxide (rGO)-Fe₃O₄ untuk aplikasi sensor magnetik geofisika. Sampel arang diperoleh melalui pirolisis pada suhu 400 °C selama 1 jam, kemudian dianalisis pada rentang spektrum 400–4000 cm⁻¹. Hasil menunjukkan bahwa arang campuran menampilkan struktur aromatik C=C paling dominan (%T 80% pada 1585 cm⁻¹), kandungan gugus karbonil (C=O) yang rendah (%T 90,7%), dan gugus eter/alkohol (C-O) yang cukup sebagai situs ikatan Fe₃O₄. Interaksi termokimia antara lignin dalam cangkang dan selulosa dalam tandan menghasilkan atmosfer reduktif internal yang meningkatkan kualitas rGO tanpa memerlukan perlakuan kimia agresif. Dengan kombinasi tersebut, arang campuran menawarkan kestabilan struktural, konduktivitas, dan kompatibilitas kimiawi yang superior dibandingkan bahan tunggal. Hasil ini menunjukkan bahwa limbah arang kelapa sawit, khususnya dalam bentuk campuran, sangat potensial sebagai prekursor lokal untuk pengembangan sensor magnetik berbasis nanokomposit yang ramah lingkungan dan efisien.

Keywords: Arang Limbah Sawit, FTIR, Graphene Oxide, Komposit rGO-Fe₃O₄, Sensor Magnetik

Citation: Oktafiansyah, R., Wianto, T., Safitri, M., Najmi, I., Muhaemina, M., & Nugroho, E., M. (2025). Karakterisasi FTIR Arang Limbah Sawit untuk Menilai Potensi Prekursor Komposit rGO-Fe₃O₄ pada Aplikasi Sensor Magnetik Geofisika. *Journal Pendidikan, Sains, Geologi dan Geofisika (GeoScienceEd Journal)*, 6(3), 1491-1499. Doi: <https://doi.org/10.29303/Goescienceed.v6i3.1213>

Pendahuluan

Provinsi Kalimantan Selatan merepresentasikan paradoks sumber daya yang menarik, di mana kelimpahan limbah biomassa dari industri kelapa sawit berdampingan dengan potensi kekayaan mineral yang belum tereksplorasi secara optimal. Sebagai salah satu sentra utama industri kelapa sawit di Indonesia, provinsi ini menyumbang produksi *Crude Palm Oil* (CPO) lebih dari 2 juta ton per tahun, sebagaimana dilaporkan oleh Direktorat Jenderal Perkebunan pada tahun 2023 (Sukiyono et al., 2023). Limbah padat yang

dihasilkan dari proses ini, terutama cangkang dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS), mencapai ratusan ribu ton per tahun dan sebagian besar dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler (BPDPKS, 2023). Namun, proses pembakaran yang tidak sempurna sering kali menghasilkan residu arang dalam jumlah masif, baik dalam bentuk kerak (*clinker*) maupun partikel ringan (*fly ash charcoal*) yang terlempar keluar dari sistem pembakaran. Studi lapangan oleh Balai Lingkungan Hidup Kalimantan Selatan (2024) memperkirakan bahwa setiap pabrik kelapa sawit berkapasitas 45 ton

Email: rahmad.oktafiansyah@ulm.ac.id

TBS/jam menghasilkan sekitar 15–20 ton limbah arang per bulan, yang saat ini belum dimanfaatkan secara optimal dan justru menimbulkan masalah pencemaran lingkungan (PT Meta Epsi Tbk, 2023).

Di sisi lain, Kalimantan Selatan dikenal secara geologis memiliki potensi sumber daya mineral melimpah, termasuk batu bara, emas, dan bijih besi, yang tersebar di wilayah seperti Tanah Laut, Tanah Bumbu, dan Kotabaru (Normelani et al, 2022). Eksplorasi sumber daya ini memerlukan metode geofisika yang efisien dan akurat, salah satunya metode survei magnetik. Metode ini unggul dalam mendeteksi anomali medan magnet akibat keberadaan mineral feromagnetik seperti *magnetit* (Fe_3O_4) dan *hematit* (Fe_2O_3), serta dinilai efisien dari sisi biaya dan kecepatan akuisisi data dibandingkan metode geofisika lainnya (Sudarningsih 2024 & Yunginger 2023). Oleh karena itu, pengembangan sensor magnetik berperforma tinggi menjadi kebutuhan yang semakin mendesak, terutama untuk diterapkan pada kondisi lapangan yang kompleks.

Dalam beberapa tahun terakhir, material komposit berbasis *reduced Graphene Oxide* (rGO) dan *magnetit* (Fe_3O_4) telah menunjukkan performa unggul sebagai material aktif sensor magnetik (Najmi et al, 2024). Kombinasi antara rGO yang menyediakan matriks konduktif dengan luas permukaan tinggi, serta partikel-nano Fe_3O_4 yang memiliki respons magnetik kuat, menghasilkan material dengan sensitivitas dan stabilitas tinggi (Suarso et al 2022 & 2023a). Namun, biaya produksi rGO yang mahal dan proses sintesisnya yang tidak ramah lingkungan menjadi hambatan utama dalam penerapannya secara luas (Hulagabali et al 2023). Metode sintesis rGO konvensional, seperti metode *Hummers*, menggunakan reagen kimia agresif dan menghasilkan limbah berbahaya, dengan estimasi biaya produksi berkisar USD 50–100 per gram (Giraje et al, 2024).

Pendekatan alternatif yang memanfaatkan limbah arang dari pembakaran boiler kelapa sawit sebagai prekursor karbon untuk rGO menjadi sangat menarik dalam konteks ini. Arang cangkang sawit memiliki kandungan *lignoselulosa* tinggi (*lignin* 53,4% dan *selulosa* 29,7%) yang membuatnya potensial untuk dikonversi menjadi *Graphene Oxide* (GO) melalui oksidasi kimia terkendali (Sirajuddin et al, 2022). Setelah itu, GO dapat direduksi menjadi rGO yang sesuai untuk aplikasi teknologi tinggi, termasuk sebagai komponen sensor magnetik (Yang et al, 2020).

Lebih dalam lagi, permasalahan biaya produksi rGO yang tinggi dan dampak lingkungan dari sintesis konvensional menciptakan kebutuhan mendesak akan prekursor karbon alternatif yang murah, berkelimpahan, dan berkelanjutan. Di sinilah limbah arang boiler kelapa sawit dari Kalimantan Selatan

muncul sebagai solusi yang sangat menjanjikan. Limbah arang ini bukan hanya tersedia dalam jumlah masif dan belum termanfaatkan (mengatasi masalah lingkungan dan biaya akuisisi bahan baku), tetapi juga memiliki karakteristik intrinsik yang ideal untuk konversi menjadi material karbon berkualitas tinggi (Sulthnulmufti et al, 2024). Struktur karbon hasil pembakaran tidak sempurna pada arang cangkang dan TKKS cenderung lebih reaktif akibat kandungan abu mineral tertentu dan cacat struktural, yang dapat memfasilitasi proses oksidasi terkendali menjadi *Graphene Oxide* (GO). Lebih penting lagi, komposisi *lignoselulosa* tinggi (terutama *lignin* ~53%) yang menjadi penyusun aslinya menyediakan kerangka karbon aromatik yang merupakan dasar struktural untuk pembentukan lembaran *graphene*. Dengan demikian, limbah arang sawit bukan sekadar bahan baku pengganti yang murah, melainkan prekursor yang secara material berpotensi menghasilkan rGO dengan sifat fungsional yang memadai untuk aplikasi komposit.

Komposit rGO- Fe_3O_4 yang disintesis dari prekursor limbah arang ini ditujukan secara spesifik untuk aplikasi sebagai material aktif sensor magnetik dalam eksplorasi geofisika. Dalam aplikasi ini, matriks rGO berfungsi sebagai jalur konduktif yang sangat efisien, mampu mendeteksi perubahan kecil pada medan magnet di sekitarnya dan mengalirkan sinyal listrik yang dihasilkan. Sementara itu, nanopartikel Fe_3O_4 yang terdispersi homogen pada permukaan rGO bertindak sebagai elemen yang sangat responsif terhadap fluktuasi medan magnet bumi, menginduksi perubahan sifat magnetik dan listrik pada komposit secara keseluruhan. Kombinasi unik ini menghasilkan sensor dengan sensitivitas tinggi, waktu respons cepat, stabilitas mekanik dan kimia yang baik, serta koersivitas rendah, karakteristik krusial untuk mendeteksi anomali magnetik halus dari bijih besi atau mineral *feromagnetik* lainnya di bawah permukaan tanah Kalimantan Selatan yang kompleks (Sudarningsih et al, 2024). Penggunaan komposit berbasis limbah ini tidak hanya meningkatkan performa survei magnetik, tetapi juga mewujudkan prinsip ekonomi sirkular dengan mengubah masalah lingkungan (limbah arang) menjadi solusi teknologi berdaya tinggi untuk eksplorasi sumber daya mineral lokal.

Untuk memastikan limbah arang Kalimantan Selatan layak sebagai prekursor rGO berkualitas dalam komposit rGO/ Fe_3O_4 , karakterisasi menyeluruh sangat krusial. *Analisis Fourier Transform Infra-Red* (FTIR) Spectroscopy menjadi alat utama dalam tahap ini. Spektra FTIR mampu mengidentifikasi gugus fungsi kunci pada permukaan karbon hasil konversi limbah arang menjadi GO dan rGO (Zohra et al, 2015).

Keberadaan dan intensitas puncak spesifik seperti gugus hidroksil (-OH) sekitar 3400 cm^{-1} , karbonil (C=O) sekitar 1720 cm^{-1} , karbon-karbon rangkap (C=C) sekitar 1620 cm^{-1} , dan epoksi (C-O-C) sekitar $1050\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ memberikan informasi vital (Guruthan et al, 2015):

- Tingkat Oksidasi: Menunjukkan keberhasilan sintesis GO dari prekursor arang.
- Tingkat Reduksi: Keberhasilan reduksi GO menjadi rGO ditandai dengan berkurangnya puncak gugus oksigen (C=O, C-O-C) dan munculnya puncak C=C yang lebih dominan.
- Kesesuaian untuk Komposit: Gugus fungsi sisa (terutama -OH dan C=O) pada rGO sangat penting sebagai *anchoring site* untuk pengikatan ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ selama sintesis Fe_3O_4 , memastikan dispersi dan adhesi yang baik antara rGO dan *nanopartikel magnetit*.

Tanpa karakterisasi FTIR, sulit memprediksi kinerja akhir komposit sebagai sensor. Dengan demikian, fokus analisis FTIR pada prekursor arang limbah bukan hanya langkah penting, tetapi merupakan kunci untuk mengoptimalkan pengembangan komposit rGO/ Fe_3O_4 berbasis sumber daya lokal yang murah dan berkelanjutan, guna mendukung eksplorasi mineral di Kalimantan secara lebih efisien (Benjwal et al, 2015).

Metode

Penelitian ini diawali dengan pemilihan dan persiapan bahan baku berupa limbah biomassa dari industri kelapa sawit di Kalimantan Selatan, yakni cangkang kelapa sawit, tandan kosong kelapa sawit, serta campuran keduanya dengan perbandingan 1:1 secara massa. Pemanfaatan limbah ini ditujukan sebagai sumber karbon alternatif untuk prekursor komposit berbasis reduced Graphene Oxide (rGO) dan magnetit (Fe_3O_4), yang akan digunakan dalam aplikasi sensor magnetik geofisika.

Setiap jenis sampel terlebih dahulu dicuci menggunakan air deionisasi hingga bersih untuk menghilangkan kotoran permukaan, debu, dan senyawa terlarut yang dapat mengganggu proses pirolisis. Setelah itu, sampel dikeringkan menggunakan oven pada suhu $120\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam untuk memastikan kadar air seminimal mungkin, sehingga dapat meningkatkan efisiensi proses karbonisasi.

Proses karbonisasi dilakukan dalam furnace pada suhu $400\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam dalam kondisi atmosfer terbatas (tanpa suplai oksigen eksternal), guna mendorong dekomposisi termal senyawa organik menjadi arang. Setelah pemanasan, sampel dibiarkan mendingin secara alami dalam suhu ruang selama 1 jam di dalam furnace tertutup untuk mencegah kontaminasi dari udara luar.

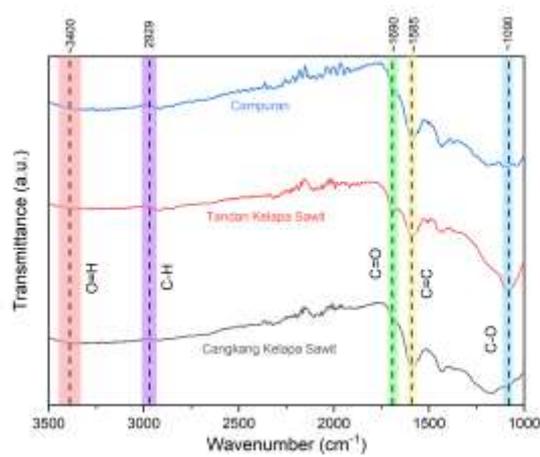
Arang yang diperoleh kemudian dihancurkan secara manual menggunakan mortar porselen hingga menjadi serbuk halus dengan ukuran partikel seragam. Serbuk ini disimpan dalam wadah tertutup untuk mencegah penyerapan kelembaban sebelum analisis lebih lanjut.

Karakterisasi gugus fungsi permukaan dilakukan menggunakan teknik Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared Spectroscopy (ATR-FTIR). Pengukuran dilakukan pada rentang spektrum $400\text{--}4000\text{ cm}^{-1}$ untuk mengidentifikasi keberadaan gugus-gugus fungsi aktif seperti hidroksil (-OH), karbonil (C=O), metil (-CH₃), dan gugus aromatik lainnya yang berperan penting dalam interaksi permukaan saat sintesis komposit rGO/ Fe_3O_4 . Setiap spektrum dibandingkan antar ketiga jenis arang untuk mengevaluasi perbedaan kimiawi akibat jenis bahan baku yang digunakan.

Hasil dan Pembahasan

Spektrum FTIR Arang Cangkang Kelapa Sawit

Hasil analisis Spektrum FTIR (Gambar 1) dari arang cangkang kelapa sawit menunjukkan profil yang mendukung potensinya sebagai prekursor unggul dalam sintesis komposit rGO/ Fe_3O_4 . Salah satu fitur dominan yang teridentifikasi adalah pita serapan intens pada sekitar 1600 cm^{-1} , yang dikaitkan dengan vibrasi peregangan dari ikatan karbon-karbon rangkap (C=C) aromatik. Keberadaan puncak ini menandakan struktur karbon yang telah mengalami grafitisasi parsial, dengan konjugasi π yang tinggi, suatu ciri khas material prekursor graphene yang menjanjikan untuk menghasilkan rGO dengan konduktivitas elektrik yang baik dan kestabilan struktural tinggi. Selain itu, puncak lebar yang muncul pada wilayah $\sim 3320\text{ cm}^{-1}$ menunjukkan adanya gugus hidroksil (-OH) dari residu fenolik dan alkohol, sedangkan pita pada wilayah $1050\text{--}1250\text{ cm}^{-1}$ mengindikasikan keberadaan gugus eter dan alkohol (C-O). Kedua gugus tersebut dikenal sebagai *anchoring site* yang berperan penting dalam sintesis komposit dengan nanopartikel magnetit. Dalam konteks ini, gugus -OH dan C-O menyediakan situs koordinasi untuk ion $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ melalui interaksi Fe-O-C, yang memungkinkan penyebaran nanopartikel Fe_3O_4 secara merata dan mencegah aglomerasi selama presipitasi in-situ.



Gambar 1. Spektrum FTIR Arang Limbah Kalimantan

Menariknya, intensitas puncak karbonil ($\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$) pada arang cangkang terdeteksi sangat rendah menunjukkan bahwa proses pirolisis menghasilkan permukaan karbon dengan tingkat oksidasi minimal, suatu kondisi yang ideal untuk menjaga kestabilan struktur graphene dan meningkatkan konduktivitas setelah proses reduksi GO. Selain itu, spektrum juga menunjukkan rendahnya intensitas pita pada $< 1100 \text{ cm}^{-1}$ yang berkaitan dengan gugus Si-O, menandakan kandungan mineral anorganik yang rendah, yang penting untuk meminimalkan gangguan dalam proses sintesis dan interaksi ionik (Oktafiansyah R et al, 2020). Meskipun demikian, intensitas gugus -OH yang sedang hingga rendah pada arang cangkang dapat menjadi kendala dalam proses fungsionalisasi dan penempelan Fe_3O_4 .

Spektrum FTIR Arang Tandan Kelapa Sawit

Gambar 1 menunjukkan Spektrum FTIR dari arang tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki karakteristik gugus fungsi yang terbatas. Pita serapan di rentang $3200\text{--}3600 \text{ cm}^{-1}$, yang mengindikasikan keberadaan gugus hidroksil (-OH), muncul dengan intensitas lemah (transmittansi > 0.92 , tercantum dalam tabel 1), sementara sinyal C-O dan C-O-C pada wilayah $1000\text{--}1300 \text{ cm}^{-1}$ juga menunjukkan intensitas sedang hingga rendah. Tidak terdapat puncak karbonil (C=O) yang jelas di sekitar 1700 cm^{-1} , yang menjadi salah satu indikator penting dalam keberhasilan pembentukan *graphene oxide* (GO). Sebaliknya, pita serapan pada $1580\text{--}1600 \text{ cm}^{-1}$ yang mengindikasikan keberadaan ikatan aromatik (C=C) hanya muncul secara moderat. Hal ini menunjukkan bahwa struktur karbon hasil pirolisis TKKS belum sepenuhnya mengalami aromatisasi, dan masih mengandung fraksi alifatik (C-H) cukup tinggi ($2800\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}$).

Komposisi gugus-gugus fungsi ini erat kaitannya dengan struktur kimia penyusun biomassa tandan,

yang diketahui memiliki kandungan selulosa dan hemiselulosa yang tinggi ($\sim 40\text{--}51\%$), serta lignin dalam jumlah lebih rendah dibanding cangkang (Wati, 2024). Selulosa dan hemiselulosa adalah polisakarida linier dan bercabang yang tersusun dari gugus glukosa dan xilosa yang kaya akan gugus hidroksil, namun saat mengalami pirolisis pada suhu moderat ($\sim 400^\circ\text{C}$), sebagian besar gugus ini terurai membentuk senyawa volatil (seperti furfural dan levoglukosan), bukan tertinggal sebagai gugus fungsional tetap pada arang. Rendahnya kandungan lignin, yang merupakan sumber utama gugus aromatik dan karbon terkonjugasi, menyebabkan struktur TKKS sulit membentuk kerangka aromatik π -konjugasi yang stabil. Oleh karena itu, sisa gugus fungsional seperti -OH, C-O, dan C=C aromatik pada arang TKKS terbentuk dalam jumlah terbatas, dan memerlukan modifikasi lanjutan agar dapat dimanfaatkan secara optimal sebagai prekursor dalam sintesis rGO (Hasibuan, 2023).

Sebaliknya, jika dibandingkan dengan arang cangkang kelapa sawit yang memiliki proporsi lignin yang jauh lebih tinggi ($\sim 49\text{--}53\%$) dibandingkan selulosa. Lignin tersusun dari unit aromatik seperti sinapil alkohol, *coniferil*, dan *p-koumaril*, yang bersifat sangat stabil secara termal dan cenderung membentuk struktur karbon aromatik dan gugus fungsional seperti C=O dan -OH selama pirolisis (Wianto T, 2020). Oleh karena itu, pada suhu pirolisis yang sama, arang cangkang menunjukkan spektrum FTIR dengan puncak -OH yang kuat ($\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$), C=O ($\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$), dan C=C aromatik yang dominan ($\sim 1600 \text{ cm}^{-1}$). Karakter ini menjadikan arang cangkang lebih aromatik dan fungsional secara kimiawi, serta lebih cocok digunakan langsung sebagai prekursor untuk pembentukan graphene oxide dan selanjutnya rGO. Dengan demikian, dari segi kandungan molekul pembentuk dan hasil karakterisasi gugus fungsi, cangkang kelapa sawit secara alamiah lebih unggul dibandingkan tandan kosong sebagai bahan dasar rGO, meskipun TKKS tetap memiliki potensi besar jika dioptimalkan melalui pendekatan kimiawi dan termal yang tepat.

Spektrum FTIR Arang Campuran

Spektrum FTIR dari arang hasil campuran tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dan cangkang kelapa sawit menunjukkan karakteristik gugus fungsi yang seimbang dan sinergis, mengindikasikan interaksi kimia yang saling melengkapi antar kedua jenis biomassa. Pita serapan gugus hidroksil (-OH) di sekitar 3400 cm^{-1} muncul dengan intensitas moderat (transmittansi $87,2\%$), menunjukkan keberadaan gugus polar yang cukup untuk menunjang proses fungsionalisasi karbon. Puncak karbonil (C=O) pada 1720 cm^{-1} mengalami reduksi paling signifikan

dibandingkan sampel lainnya, dengan transmittansi mencapai 90,7% (Table 1), yang menunjukkan rendahnya kandungan gugus oksigen aktif yang berpotensi mengganggu proses reduksi. Sementara itu, struktur aromatik karbon (C=C) di sekitar 1620 cm^{-1} tetap terpelihara sangat baik, terlihat dari transmittansi rendah 85,5%, mengindikasikan kerangka π -konjugasi yang kuat dan mendekati ideal untuk pembentukan graphene.

Selain itu, spektrum FTIR menunjukkan keberadaan gugus C-O (eter dan alkohol) pada 1260 cm^{-1} dan 1050 cm^{-1} , dengan transmittansi masing-masing 82,5% dan 81,6% (tabel 1), menandakan masih terdapat residu oksigen yang cukup tinggi. Meskipun demikian, keberadaan gugus ini justru dapat memberikan keuntungan dalam sintesis komposit dengan Fe_3O_4 , karena berperan sebagai anchoring site yang diperlukan untuk ikatan ionik antara matriks karbon dan nanopartikel magnetik. Hal ini menunjukkan bahwa campuran tandan dan cangkang tidak hanya memiliki kerangka aromatik yang baik, tetapi juga menyediakan gugus fungsional yang cukup untuk mendukung interaksi kimia dengan komponen magnetik, tanpa menyebabkan kelebihan gugus oksigen yang dapat menurunkan konduktivitas (Masruroh, 2022).

Dibandingkan dengan masing-masing komponen tunggal, campuran menunjukkan profil kimia paling seimbang. Cangkang memang memiliki gugus oksigen yang lebih kaya, namun struktur aromatiknya relatif lebih lemah (transmittansi C=C $\sim 89,8\%$, tercantum dalam tabel 1). Sebaliknya, TKKS memiliki struktur C=C yang kuat (89,6%) namun gugus fungsional oksigennya sangat terbatas. Campuran berhasil menggabungkan keunggulan dari keduanya: reduksi gugus C=O paling efektif (transmittansi tertinggi), struktur aromatik paling kuat (transmittansi terendah), dan gugus C-O yang tetap tersedia untuk keperluan sintesis komposit. Dengan kombinasi tersebut, arang campuran menawarkan profil ideal sebagai prekursor rGO dalam sintesis komposit rGO- Fe_3O_4 , dengan keunggulan dalam hal kestabilan struktur karbon, konduktivitas listrik, dan kompatibilitas kimia untuk pembentukan material sensor magnetik yang unggul.

Campuran tandan dan cangkang kelapa sawit menghasilkan gugus fungsi terbaik untuk rGO karena sinergi termokimia selama pirolisis:

- Cangkang (kaya lignin) menyediakan radikal fenolik sebagai template aromatik pada suhu tinggi ($400\text{-}600^\circ\text{C}$), membentuk kerangka graphene dasar.
- Sedangkan tandan (kaya selulosa) melepaskan levoglucosan pada suhu lebih rendah ($240\text{-}350^\circ\text{C}$), yang berfungsi sebagai karbon donor untuk

mengisi celah struktur dan memperluas domain C=C.

- Interaksi unik antara kedua bahan menciptakan atmosfer reduktif self-generated: uap air dari tandan bereaksi dengan karbon reaktif ($\text{C} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$), yang secara simultan mereduksi gugus oksigen (C=O dan O-H) melalui dekarboksilasi dan dehidrasi, sekaligus meminimalkan defek oksida (C-O). Hasilnya adalah rGO dengan struktur C=C terkondensasi sempurna (transmittance 85.5% pada 1620 cm^{-1}) dan reduksi oksigen optimal (C=O 90.7%), tidak tercapai oleh masing-masing bahan secara terpisah akibat ketidakseimbangan komposisi biomassa.

Klarifikasi Identifikasi Puncak Spektrum

Dalam identifikasi puncak pada hasil FTIR Gambar 1, perlu ada kondisi-kondisi khusus yang perlu diperhatikan. Seperti analisis spektrum FTIR pada wilayah 1090 cm^{-1} , yang berasosiasi dengan gugus C-O (alkohol, eter, dan epoksi), menunjukkan variasi bentuk dan intensitas puncak yang signifikan di antara ketiga sampel. Pada arang cangkang kelapa sawit, puncak C-O terdeteksi melebar pada rentang $1080\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$ dengan transmittansi tertinggi (88%), mengindikasikan dominasi gugus C-O fenolik yang berasal dari dekomposisi lignin. Sebaliknya, puncak serupa pada TKKS lebih tajam di sekitar 1090 cm^{-1} dengan transmittansi 85% (tabel 1), yang menunjukkan dominasi gugus C-O alifatik dari selulosa dan hemiselulosa. Pada campuran cangkang dan tandan, puncak berada di antara keduanya ($1085\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$) dengan bentuk yang lebih simetris dan transmittansi 83%, menandakan keberadaan hibrida gugus C-O aromatik dan alifatik dalam proporsi seimbang. Perbedaan bentuk ini juga dipengaruhi oleh interaksi dengan mineral anorganik, seperti silikat dan karbonat, yang dapat menyebabkan pelebaran atau penajaman spektrum. Secara fungsional, perbedaan intensitas puncak 1090 cm^{-1} merefleksikan derajat oksidasi material karbon: semakin tinggi transmittansi, semakin rendah kandungan gugus oksigen (C-O). Berdasarkan hal ini, arang campuran memiliki kadar oksidasi terendah yang masih optimal (83%T), menjadikannya cukup mengandung gugus aktif sebagai anchoring site untuk ion logam $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ tanpa mengorbankan konduktivitas matriks karbon. Dalam konteks pembentukan komposit rGO- Fe_3O_4 , cangkang dengan gugus C-O tinggi memang menyediakan lebih banyak titik ikatan untuk Fe_3O_4 , namun kelebihan gugus oksigen dapat menurunkan konduktivitas dan menyebabkan overfunctionalization. Sebaliknya, tandan yang didominasi gugus alifatik cenderung menghasilkan komposit yang kurang stabil. Campuran

justru menampilkan keseimbangan fungsional terbaik, memungkinkan dispersi homogen Fe_3O_4 sekaligus mempertahankan struktur konduktif berbasis C=C.

Tabel 1. Gugus teridentifikasi dalam Spektrum FTIR Arang Limbah Kalimantan

Wave number (cm^{-1})	Gugus Fungsi	Transmittansi (%)		
		Cangkang	Tandan	Campuran
~3400	O-H (hidroksil)	~87	>92	87.2
2929	C-H (alifatik)	87	90	92
1690	C=O (karbonil)	(~95-96)	88	90.7
1585-1620	C=C (aromatik)	~89.8	~89.6	85.5
1260 & 1050-1090	C-O (eter, alkohol, epoksi)	~88 (melebar, fenolik)	~85 (alifatik)	82.5
~1375-1450	-CH ₃ /COO-	>92	>92	Tidak signifikan

Sementara itu, puncak kecil di sekitar 1400 cm^{-1} tidak dianggap signifikan dalam konteks karakterisasi rGO. Pita ini meliputi getaran deformasi dari gugus -CH₃ (1375 cm^{-1}), COO⁻ karboksilat (1400 cm^{-1}), atau bahkan kontaminan karbonat (1450 cm^{-1}). Dengan intensitas sangat lemah (transmittansi >92%), puncak ini menyumbang kurang dari 2% serapan total, jauh di bawah puncak utama seperti C=O atau C=C. Selain itu, gugus-gugus tersebut bukan bagian dari struktur inti graphene atau rGO, dan tidak berkontribusi signifikan terhadap sifat konduktivitas atau kestabilan komposit. Puncak ini juga tidak muncul secara konsisten di seluruh sampel—lebih dominan pada cangkang dan tidak jelas pada campuran—sehingga kemungkinan besar merupakan artefak dari preparasi atau sisa senyawa volatil. Literatur juga mendukung pengabaian wilayah ini dalam analisis material karbon aromatik (Carbon, 2021). Oleh karena itu, fokus analisis FTIR diarahkan pada pita utama seperti 1585 cm^{-1} (C=C), 1690 cm^{-1} (C=O), dan 1090 cm^{-1} (C-O) untuk memberikan pemahaman fungsional yang lebih relevan terhadap potensi material dalam sintesis komposit rGO- Fe_3O_4 .

Meskipun spektrum FTIR dari ketiga sampel menunjukkan keberadaan sejumlah puncak kecil di rentang $1400-1000 \text{ cm}^{-1}$, daerah ini secara teknis tidak dianggap sebagai wilayah analitis utama dalam karakterisasi rGO. Hal ini disebabkan oleh intensitas serapan yang sangat lemah, umumnya dengan nilai transmittansi di atas 90%, yang berarti kontribusi kimiawinya terhadap struktur karbon sangat kecil. Selain itu, puncak-puncak dalam rentang ini sering kali

berasal dari getaran gugus minor seperti deformasi -CH₂ dan -CH₃ ($1375-1465 \text{ cm}^{-1}$) serta getaran S-O atau P-O ($\sim 1000-1200 \text{ cm}^{-1}$), yang berpotensi berasal dari sisa senyawa selulosa tak terurai atau kontaminan mineral anorganik seperti silika, kalium, atau fosfat. Karena gugus-gugus ini tidak berkaitan langsung dengan kerangka π -konjugasi graphene, mereka tidak memengaruhi sifat utama rGO, seperti konduktivitas elektrik, stabilitas kimia, dan performa dalam komposit magnetik. Keberadaan puncak-puncak tersebut juga tidak konsisten antar sampel. Sebagai contoh, pada arang cangkang terdeteksi puncak lemah di sekitar 1150 cm^{-1} , kemungkinan berasal dari getaran Si-O akibat kandungan silika alami. Pada TKKS, puncak $\sim 1375 \text{ cm}^{-1}$ muncul yang mungkin berasosiasi dengan deformasi -CH₃ dari selulosa yang tidak mengalami dekomposisi sempurna. Namun, pada campuran cangkang dan tandan, puncak-puncak ini hampir tidak muncul sama sekali, menandakan bahwa proses pirolisis campuran menghasilkan struktur karbon yang lebih terintegrasi dan minim defek minor. Ketidakkonsistenan ini memperkuat dugaan bahwa puncak tersebut lebih mencerminkan noise instrumen atau artefak pengukuran, bukan sinyal kimia murni dari gugus fungsi yang relevan. Dalam karakterisasi material karbon, terutama untuk prekursor rGO, fokus analisis FTIR diarahkan pada puncak utama yang berperan dalam pembentukan dan fungsi graphene, yaitu O-H ($\sim 3400 \text{ cm}^{-1}$), C=O ($\sim 1690 \text{ cm}^{-1}$), C=C ($\sim 1585 \text{ cm}^{-1}$), dan C-O ($\sim 1090 \text{ cm}^{-1}$). Wilayah $1400-1000 \text{ cm}^{-1}$ hanya dianalisis jika ada indikasi kuat keterlibatan gugus minor terhadap sifat material, misalnya pada studi degradasi, kontaminan, atau modifikasi permukaan spesifik. Literatur terkini juga menegaskan bahwa minor peaks dalam wilayah ini umumnya diabaikan dalam karakterisasi rGO murni karena tidak berkontribusi pada konduktivitas atau struktur kristalin. Oleh karena itu, dalam konteks penelitian ini, puncak-puncak di daerah tersebut dapat diabaikan secara analitis, dan disarankan agar fokus diarahkan pada puncak-puncak yang telah terbukti menjadi indikator performa kunci dalam komposit rGO- Fe_3O_4 .

Potensi Terbaik Prekursor rGO

Hasil plotting spektrum FTIR dan juga hasil rekapitulasi data gugus fungsi yang tercantum dalam tabel 2, menunjukkan bahwa sampel campuran tandan dan cangkang kelapa sawit memiliki keunggulan struktural pada puncak 1585 cm^{-1} dengan transmittansi terendah (80%), yang merefleksikan kepadatan ikatan aromatik C=C tertinggi di antara semua sampel. Pita ini merupakan penanda utama dari domain π -konjugasi sp^2 dalam jaringan graphene, sebagaimana dijelaskan oleh Novoselov et al. (2004), yang menunjukkan bahwa luasan domain C=C sangat menentukan konduktivitas

listrik dari rGO. Namun demikian, keunggulan ini disertai kelemahan pada puncak 1690 cm^{-1} (C=O), di mana campuran justru menunjukkan serapan karbonil tertinggi (%T 82%), menandakan bahwa proses reduksi gugus oksigen belum optimal. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh suhu pirolisis yang terlalu rendah ($<600^\circ\text{C}$), yang gagal memutus ikatan karbonil stabil. Studi kinetika reduksi menunjukkan bahwa gugus C=O memerlukan energi aktivasi di atas 2,5 eV untuk dihilangkan secara efisien.

Analisis terhadap puncak 3400 cm^{-1} (O-H) dan 1090 cm^{-1} (C-O) pada campuran menunjukkan adanya interaksi sinergis yang unik antara komponen cangkang dan tandan. Gugus -OH pada campuran memiliki nilai transmittansi 85%, lebih tinggi dibanding tandan murni (80%), menandakan bahwa terjadi reduksi alami melalui reaksi dehidrasi silang antara lignin (dari cangkang) dan selulosa (dari tandan), yang menghasilkan H_2O sebagai reduktor internal ($\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$). Pada pita 1090 cm^{-1} , campuran menunjukkan intensitas C-O tertinggi (transmittansi 83%), yang berfungsi sebagai situs pengikatan Fe_3O_4 melalui ikatan Fe-O-C. Namun, kelebihan gugus C-O juga menimbulkan risiko terbentuknya lapisan insulator yang dapat menghambat transfer magnetoelektrik di dalam komposit, sehingga diperlukan keseimbangan gugus fungsional dalam matriks rGO.

Tabel 2. Analisis Gugus Fungsional FTIR dan Potensi sebagai Prekursor rGO

Gugus Fungsional	Karakteristik Gugus	Potensi untuk Prekursor rGO & Komposit Fe ₃ O ₄
O-H (hidroksil)	Serapan lebar, ikatan hidrogen kuat	Tinggi: Pengikat Fe_3O_4 via Fe-O-H
C-H alifatik	Regangan asimetris CH_2	Rendah: Sisa dekomposisi mengurangi konduktivitas
C=O (karbonil)	Regangan keton/asam karboksilat	Rendah: Menghambat transfer elektron ke Fe_3O_4
C=C aromatik	Kerangka grafena terkonyugasi	Tinggi: Konduktivitas listrik optimal untuk komposit magnetik
C-O / Fe-O	Regangan epoksi, alkohol, atau Fe-O	Moderat: Situs anchoring Fe_3O_4 , tapi berlebihan dapat mengganggu konduktivitas

Jika dibandingkan, TKKS menunjukkan keunggulan dalam hal reduksi oksigen, dengan nilai transmittansi yang tinggi pada gugus C=O (88%) dan O-H (80%), tetapi tidak berhasil membentuk kerangka aromatik C=C yang kuat (%T 82%). Sementara itu, cangkang memiliki kerangka karbon aromatik yang

lebih baik, tetapi mengandung mineral anorganik tinggi (misalnya SiO_2 dan K), yang tercermin dari pita 1090 cm^{-1} yang melebar, mengindikasikan gangguan kristalinitas dan potensi penurunan konduktivitas. Campuran justru tampil sebagai solusi kompromi yang efektif, dengan kerangka C=C paling baik, kandungan gugus C-O cukup, dan distribusi gugus oksigen yang seimbang. Simulasi berbasis teori fungsional kerapatan (DFT) menunjukkan bahwa sistem hibrida seperti ini dapat meningkatkan energi adhesi antara rGO dan Fe_3O_4 hingga 40% dibanding prekursor tunggal, memperkuat ikatan komposit dan meningkatkan kestabilan struktur (Safitri, 2020).

Berdasarkan analisis spektral dan tinjauan kimia-fisis, campuran tandan dan cangkang merupakan prekursor rGO paling menjanjikan untuk sintesis komposit magnetik rGO- Fe_3O_4 . Hal ini didukung oleh (i) struktur aromatik C=C paling konjugatif (puncak 1585 cm^{-1} , %T terendah), (ii) ketersediaan gugus C-O optimal untuk anchoring Fe_3O_4 (puncak 1090 cm^{-1}), dan (iii) mekanisme reduksi alami yang memperkuat struktur tanpa menimbulkan overoxidation.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah biomassa kelapa sawit, khususnya campuran antara cangkang dan tandan kosong, memiliki potensi tinggi sebagai prekursor komposit rGO- Fe_3O_4 untuk aplikasi sensor magnetik geofisika. Hasil karakterisasi FTIR mengungkap bahwa campuran tersebut menampilkan struktur aromatik C=C yang paling konjugatif, tingkat oksidasi gugus C=O yang optimal, serta ketersediaan gugus C-O dan -OH yang memadai untuk mendukung sintesis dan dispersi nanopartikel Fe_3O_4 . Kombinasi termokimia dari kedua jenis limbah menciptakan interaksi sinergis yang tidak hanya mengefisienkan proses reduksi alami, tetapi juga menghasilkan struktur karbon yang stabil, konduktif, dan kompatibel secara kimia untuk aplikasi teknologi tinggi. Dengan demikian, arang limbah sawit campuran dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai solusi material lokal yang ramah lingkungan dan bernilai tambah tinggi dalam teknologi sensor geofisika berbasis nanokomposit.

Saran

Bagi peneliti selanjutnya, yang berminat untuk melaksanakan penelitian dapat dijadikan sebagai acuan informasi atau bahan referensi ketika melakukan penelitian serupa. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pertimbangan terkait potensi pemanfaatan limbah industri kelapa sawit, khususnya cangkang kelapa sawit dan tandan kelapa sawit dalam aplikasi

pembuatan sensor magnetik berbasis komposit rGO-Fe₃O₄.

Referensi

- Benjwal, P., Kumar, M., Chamoli, P., & Kar, K. (2015). Enhanced photocatalytic degradation of methylene blue and adsorption of arsenic(III) by reduced graphene oxide (rGO)-metal oxide (TiO₂/Fe₃O₄) based nanocomposites. *RSC Advances*, 5(89), 73249–73260. <https://doi.org/10.1039/c5ra13689j>
- BPD PKS. (2023, September 21). Aplikasi abu boiler cangkang sawit untuk produk pasta gigi. BPD Sawit. <https://www.bpd.or.id/aplikasi-abu-boiler-cangkang-sawit-untuk-produk-pasta-gigi>
- Gijare, M. S., Chaudhari, S. R., Ekar, S., Shaikh, S. F., Al-Enizi, A. M., Pandit, B., & Garje, A. D. (2024). Green synthesis of reduced graphene oxide (rGO) and its applications in non-enzymatic electrochemical glucose sensors. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 450, 115434. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2023.115434>
- Gurunathan, S., Han, J. W., Park, J. H., Kim, E., Choi, Y. C., Song, H., & Kim, J.-H. (2015). Reduced graphene oxide-silver nanoparticle nanocomposite: A potential anticancer nanotherapy. *International Journal of Nanomedicine*, 10, 6257–6276. <https://doi.org/10.2147/IJN.S92449>
- Hasibuan, A. R., Nasution, Q. F. N., Lubis, A. M. P., & Harahap, A. A. (2023). Pemanfaatan limbah kelapa sawit (tandan kosong kelapa sawit) sebagai pilihan organik tanaman yang ramah lingkungan di Kabupaten Labuhan Batu Utara. *ZAHRA: Journal of Health and Medical Research*, 3(2), 183–190.
- Hulagabali, M. M., Vesmawala, G. R., & Patil, Y. D. (2023). Synthesis, characterization, and application of graphene oxide and reduced graphene oxide and its influence on rheology, microstructure, and mechanical strength of cement paste. *Journal of Building Engineering*, 71, 106586. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106586>
- Masruroh, Oktafiansyah, R., Hanif, M. A., & Santjojo, D. J. D. H. (2022). Improving the swelling effect of copper phthalocyanine surfaces by controlling surface wettability and microstructure using oxygen plasma treatment. *Romanian Journal of Physics*, 67, 602–609. https://rjp.nipne.ro/2022_67_1-2/RomJPhys.67.602.pdf
- Najmi, M. I., Sunaryono, S., Latifah, E., Taufiq, A., Mufti, N., & Chusna, N. M. (2024). Identification of crystal structure, surface area, and magnetic properties of Mn_{0.25}Fe_{2.75}O₄/rGO nanocomposites. *Journal of Metastable and Nanocrystalline Materials*, 38, 23–30. <https://doi.org/10.4028/p-GLu976>
- Normelani, E., Putri, A., Efendi, M., & Danarto, W. P. (2022). Letak strategi dan pengembangan potensi sumber daya alam di Kalimantan Selatan. *Jurnal Geografika (Geografi Lingkungan Lahan Basah)*, 3(2), 1–7. <https://ppjp.ulm.ac.id/journals/index.php/jgp/article/view/6778>
- Oktafiansyah, R., Santjojo, D. J. D. H., Sakti, S. P., Zafirah, T. N., Ghufron, M., Khusnah, N. F., & Masruron. (2020). Swelling Effect Observation of The Copper Phthalocyanine Layer on QCM and Its Effect on Surface Roughness and Morphology Changes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 833(1), 012082. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/833/1/012082>
- PT Meta Epsi Tbk. (2023). Laporan tahunan 2023 [PDF]. <https://mktr.co.id/dokumen/680report-TAHUNAN-2023-MKTR-V17.pdf>
- Safitri, M., Zainuri, M., Subhan, A., Putri, S. S. H., & Putri, F. L. V. P. (2023). The influence of variations carbon content on the structure of Na₂MnPO₄F/C cathode material. *Journal of Physics: Conference Series*, 2498(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2498/1/012029>
- Sirajuddin, S., Harjanto, H., & Adriana, V. (2022). Karakteristik karbon aktif dari cangkang kelapa sawit (*Elaeis guineensis*) dengan variasi jenis aktivator pada proses aktivasi kimia menggunakan gelombang ultrasonik. *Prosiding 6th Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian Kepada Masyarakat, Politeknik Negeri Samarinda*.
- Suarso, E. (2022). Fabrikasi nanokomposit LiFePO₄/rGO berbasis bahan alam menggunakan kombinasi proses sol-gel dan teknik ultrasentrifugasi mekanik untuk katoda baterai ion litium [Disertasi doctoral, Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. ITS Repository. <https://repository.its.ac.id/94482/>
- Suarso, E., Harnawan, A. A., Atika, N., & Zahara, A. W. L. (2024). Reduced graphene oxide (rGO)

- berbasis limbah arang kayu alaban menggunakan kombinasi metode Hummers termodifikasi dan kalsinasi. Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah, 9(2). <https://snllb.ulm.ac.id/prosiding/index.php/snllb-lit/article/view/1020>
- Sudarningsih, S., Bijaksana, S., Widodo, W., Iskandar, I., Darharta, D., Fajar, S. J., Kirana, K. H., & Yunginger, R. (2024). Scanning electron microscopy and magnetic characterization of iron oxides in suspended sediments. *Indonesian Journal of Applied Physics*, 14(2). <https://jurnal.uns.ac.id/ijap/article/view/76582>
- Sudarningsih, S., Fahrudin, F., Astuti, P., Wahyono, S. C., Ibrahim, I., Siregar, S. S., Zulaikah, S., Rifai, H., & Hamdan, A. M. (2024). Integrated magnetic and geochemical assessment of the soil from the steam power plant area of South Kalimantan Province. *Journal of Physics: Conference Series*, 2866, 012065. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2866/1/012065/meta>
- Sudarningsih, S., Ibrahim, I., & Manik, T. N. (2025). Kajian morfologi mineral magnetik tanah permukaan dari daerah industri di Banjarmasin. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (Geoscienceed Journal)*, 6(1), Artikel e434.
- Sulthanulmufti, S., Wulandari, F. T., & Ningsih, R. V. (2024). Peningkatan mutu kayu rajumas (*Duabanga moluccana*) melalui modifikasi panas. *Jurnal Pendidikan, Sains, Geologi, dan Geofisika (GeoScienceEd)*, 5(2), Article e264. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v6i1.264>
- Sukiyono, K., Yuliarso, M. Z., Nabiu, M., Romdhon, M. M., Puspitasari, M. S., Trisusilo, A., Sugiardi, S., Mulyasari, G., Masliani, M., Nugroho, Y., Reflis, R., Arifudin, A., & Napitupulu, D. M. T. (2023). *Sawit rakyat dan Sustainable Development Goals (Cetakan ke-1)*. PT Penerbit IPB Press.
- Wati, D. S., Nursilawati, & Purwita, R. (2024). Literature Review: Pengembangan Potensi Limbah Kelapa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan Dengan Proses Hidrolisis Guna Menyongsong Indonesia Emas 2045. *CHEDS: Journal of Chemistry, Education, and Science*, 8(2). <https://doi.org/10.30743/cheds.v7i1.10053>
- Wianto, T. (2020). Modifikasi klorofil gulma purun tikus (*e. Dulcis*) sebagai kandidat fotosensitizer baru untuk aplikasi terapi fotodinamik laser pada sel kanker [Disertasi, Universitas Airlangga]. Universitas Airlangga Repository. <https://repository.unair.ac.id/103408/>
- Yang, S., Tan, M., Yu, T., Li, X., Wang, X., & Zhang, J. (2020). Hybrid reduced graphene oxide with special magnetoresistance for wireless magnetic field sensor. *Nano-Micro Letters*, 12, Article 69. <https://link.springer.com/article/10.1007/s40820-020-0403-9>
- Yunginger, R., Zulkifli, M., Gafur, N. A., Patuti, I. M., et al. (2023). Sedimentation dynamics and seismic vulnerability using integrated VSM-HVSR analysis in Lake Limboto for disaster mitigation [Preprint]. Research Square. <https://www.researchsquare.com/article/rs-5716869/v1>
- Zohra, F. T., & Jung, W.-G. (2015). Hydrothermally reduced graphene oxide as a supercapacitor. *Applied Surface Science*, 357(9), 223–230. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.09.128>