

Grafena Oksida dari Biomassa: Sintesis, Karakterisasi dan Aplikasi Berkelanjutan

**Wara Dyah Pita Rengga¹, Luluk Arvi Cahyaning Suwandi¹,
Naila Khoirina²**

¹Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Institute Sebelas November

wdpit@ mail.unnes.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.15294/isk.v1i.585>

ISBN 978-623-293-507-5

ABSTRAK

Grafena oksida berbasis biomassa menawarkan alternatif terhadap grafit alam yang tidak terbarukan. Biomassa seperti: sekam padi, tempurung kelapa, kulit ari kedelai dan limbah lignoselulosa lainnya memiliki kandungan karbon tinggi dan struktur aromatik yang sesuai untuk pembentukan lembaran grafena melalui proses karbonisasi dan oksidasi. Penelitian ini bertujuan meninjau potensi biomassa sebagai prekursor grafena, menelaah metode sintesis berkelanjutan seperti: pirolisis, aktivasi kimia dan modifikasi metode Hummers, serta menganalisis karakterisasi dan performa material yang dihasilkan. Hasil kajian menunjukkan bahwa pendekatan pirolisis pada suhu 400–800°C diikuti aktivasi kimia menggunakan agen seperti KOH atau H₃PO₄ menghasilkan biochar berpori tinggi sebagai bahan antara yang ideal. Modifikasi metode Hummers dengan oksidator ramah lingkungan seperti H₂O₂ berhasil menurunkan dampak toksik tanpa mengurangi efisiensi oksidasi. GO berbasis biomassa yang diperoleh memiliki luas permukaan spesifik 500–1500 m²/g, rasio C/O sekitar 2–4, kandungan gugus oksigen fungsional melimpah, serta konduktivitas listrik memadai untuk aplikasi elektroda dan komposit. Secara keseluruhan, GO berbasis biomassa menunjukkan kinerja kompetitif

terhadap GO konvensional, dengan potensi besar dalam penyimpanan energi, katalisis, adsorpsi polutan dan material komposit berkelanjutan. Kesimpulannya, pengembangan GO berbasis biomassa berkontribusi pada peningkatan nilai tambah limbah organik, pengurangan ketergantungan grafit alam, serta mendukung ekonomi sirkular dan *green chemistry* menuju teknologi material berkelanjutan.

Kata Kunci: Grafena oksida, biomassa, berkelanjutan.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan terhadap material fungsional ramah lingkungan semakin meningkat seiring dengan krisis energi global, penurunan kualitas lingkungan dan tuntutan menuju ekonomi hijau. Material berbasis karbon memainkan peran penting dalam berbagai aplikasi mulai dari penyimpanan energi, katalisis, sensor, hingga pemurnian air sehingga diperlukan inovasi material yang tidak hanya unggul secara fungsional, tetapi juga berkelanjutan secara ekologis (Liu & Zhang, 2020).

Salah satu material yang menonjol adalah grafena oksida (GO), turunan dari grafena yang memiliki gugus oksigen aktif seperti hidroksil, epoksi, dan karboksil. Kehadiran gugus ini memberikan keunggulan dalam hal reaktivitas kimia, kompatibilitas dalam larutan, serta kemudahan modifikasi untuk berbagai aplikasi. GO telah banyak diteliti untuk aplikasi superkapasitor, fotokatalis, sensor gas dan adsorben limbah karena struktur lamelanya yang besar dan konduktivitas tinggi (Maroulas *et al.*, 2024).

Namun demikian, permasalahan utama dalam pengembangan GO adalah ketergantungan pada bahan baku grafit alam, yang diperoleh melalui penambangan mineral tak terbarukan. Proses penambangan ini tidak hanya terbatas secara ketersediaan sumber daya, tetapi juga berdampak terhadap degradasi lingkungan, emisi karbon dan penggunaan

bahan kimia berbahaya selama proses oksidasi.

Biomassa sebagai alternatif telah menjadi sumber karbon yang menarik karena ketersediaannya yang melimpah, sifatnya yang terbarukan, serta kandungan karbon yang tinggi (Zhu *et al.*, 2016). Berbagai jenis biomassa seperti: sekam padi, tempurung kelapa, kulit kopi, ampas tebu dan tongkol jagung telah diteliti sebagai prekursor potensial untuk sintesis GO dan material karbon lainnya. Pemanfaatan biomassa ini tidak hanya memberikan solusi terhadap keterbatasan sumber grafit, tetapi juga mendukung prinsip ekonomi sirkular dan pengelolaan limbah berkelanjutan (Wang *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2023).

Eksplorasi GO berbasis biomassa mendukung transisi menuju teknologi material hijau yang ramah lingkungan, efisien secara energi dan mendukung tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs 7, 9, 12, dan 13). Kajian ini berupa metode sintesis GO berbasis biomassa yang efisien dan ramah lingkungan. Bahan ini perlu dilakukan analisis dari uji karakteristik berupa struktural, morfologi, serta sifat fisikokimia GO yang dihasilkan dari berbagai jenis biomassa. Selanjutnya dilakukan evaluasi potensi serta prospek aplikasinya dalam mendukung pengembangan material fungsional berkelanjutan pada bidang energi, lingkungan dan teknologi hijau.

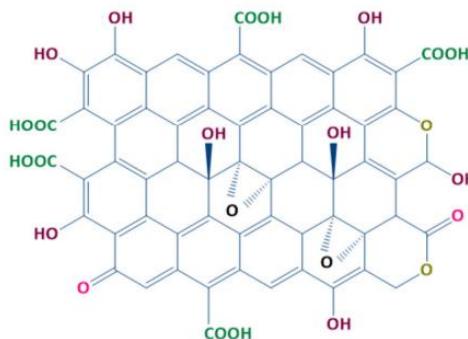
2. STRUKTUR DAN SIFAT GO

GO merupakan turunan dari grafena yang tersusun atas lembaran karbon heksagonal berlapis dengan penambahan gugus oksigen fungsional seperti hidroksil (-OH), epoksi (C-O-C), karbonil (C=O), dan karboksil (-COOH) pada permukaannya (Purwandari *et al.*, 2023). Kehadiran gugus-gugus oksigen ini menyebabkan perubahan signifikan pada sifat elektronik, kimia, dan fisik grafena murni. Grafena merupakan material tanpa celah energi (*zero-gap material*) yang tersusun atas

atom-atom karbon berikatan sp^2 , membentuk kisi heksagonal dua dimensi (*two-dimensional sp^2 -honeycomb lattice*) (Kumila & Liu, 2017).

GO memiliki struktur berlapis yang menyerupai grafit, namun bidang atom karbonnya mengalami oksidasi berat karena selain mengandung atom karbon, juga terdapat berbagai gugus oksigen. Keberadaan gugus oksigen tersebut tidak hanya memperbesar jarak antar lapisan (*interlayer spacing*), tetapi juga meningkatkan sifat hidrofilik pada permukaan lapisan. Akibatnya, lapisan teroksidasi ini mudah terdispersi atau terkelupas di dalam air melalui proses ultrasonikasi (Yuliana *et al.*, 2024).

Perbedaan utama antara grafena, GO, dan reduced GO (rGO) terletak pada tingkat oksidasi dan struktur elektroniknya. Grafena murni memiliki konduktivitas sangat tinggi dan struktur sempurna tanpa gugus oksigen. GO mengalami oksidasi berat sehingga lebih reaktif tetapi kurang konduktif. Sementara itu, rGO merupakan hasil reduksi GO yang bertujuan mengembalikan sebagian struktur sp^2 grafena asli untuk memperbaiki konduktivitas listrik, meskipun tidak sepenuhnya identik dengan grafena murni (Singh *et al.*, 2016). Hubungan ketiganya dapat dipandang sebagai suatu kontinum struktur karbon dari grafena (konduktif) ke GO (oksidatif) hingga rGO (semi-konduktif). Struktur GO seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dimana Atom Oksigen dan Hidrogen dimasukkan ke dalam jaringan Heksagonal (Gutierrez-Cruz *et al.*, 2022)



Gambar 1. Struktur Kimia GO (Gutierrez-Cruz *et al.*, 2022)

2.1 Metode Sintesis GO Konvensional

Sintesis GO umumnya dilakukan melalui oksidasi grafit menggunakan berbagai metode kimia yang telah dikembangkan sejak pertengahan abad ke-20. Metode Hummers merupakan salah satu teknik oksidasi grafit yang dilakukan dengan mereaksikan grafit bersama kalium permanganat ($KMnO_4$) dan natrium nitrat ($NaNO_3$) dalam larutan asam sulfat (H_2SO_4). Metode ini dianggap lebih unggul karena selama proses oksidasi tidak menghasilkan gas klorin dioksida (ClO_2), sehingga lebih aman. Selain itu, reaksi oksidasi dapat berlangsung lebih cepat pada suhu yang relatif rendah. Produk akhir berupa graphene oxide (GO) yang dihasilkan melalui metode Hummers umumnya memiliki tingkat oksidasi yang lebih tinggi, sehingga metode ini sering digunakan dalam sintesis GO.

Dalam beberapa tahun terakhir, muncul tren menuju metode sintesis GO yang lebih ramah lingkungan, dengan mengganti bahan grafit alam menjadi prekursor biomassa seperti: lignoselulosa, ampas tebu, sekam padi, atau tempurung kelapa. Pendekatan ini mengombinasikan proses pirolisis atau aktivasi kimia untuk mengonversi biomassa menjadi karbon amorf, yang kemudian dioksidasi menggunakan agen ringan seperti asam askorbat, hidrogen peroksida, atau campuran asam organik. Proses ini tidak hanya menekan penggunaan

bahan berbahaya, tetapi juga mendukung ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah pertanian menjadi material bernilai tinggi (Zhu *et al.*, 2016).

Dengan demikian, evolusi metode sintesis GO dari Hummers konvensional menuju pendekatan biomassa berkelanjutan mencerminkan pergeseran paradigma dalam sains material menuju teknologi hijau dan efisiensi energi. Inovasi ini diharapkan membuka jalan bagi produksi GO berskala industri yang tidak hanya berkinerja tinggi, tetapi juga ramah lingkungan dan ekonomis.

2.2 Biomassa sebagai Sumber Karbon

Biomassa merupakan sumber karbon terbarukan yang melimpah dan berpotensi besar untuk menggantikan grafit alam dalam sintesis GO. Secara umum, biomassa tersusun atas tiga komponen utama yaitu selulosa, hemiselulosa dan lignin, yang membentuk struktur dasar dinding sel tanaman (Zhu *et al.*, 2016). Selulosa merupakan polimer linier glukosa dengan ikatan β -1,4-glikosidik yang berperan sebagai kerangka struktural utama dan memberikan kekuatan mekanik. Hemiselulosa bersifat amorf serta mudah terdegradasi secara termal, sedangkan lignin adalah polimer aromatik kompleks yang kaya akan gugus fenolik dan memberikan ketahanan terhadap degradasi kimia dan biologis (Nguyen & Trih, 2022). Kombinasi ketiga komponen ini menjadikan biomassa kaya akan atom karbon dan gugus oksigen, yang berfungsi penting dalam proses oksidasi dan pembentukan struktur berlapis GO.

Biomassa umumnya menjalani proses pirolisis atau karbonisasi pada suhu menengah (400–800 °C) untuk menghasilkan karbon amorf berporositas tinggi, yang kemudian dapat dioksidasi atau dimodifikasi lebih lanjut menjadi produk berbasis grafena seperti graphene oxide (GO) (Plenca *et al.*, 2023). Kandungan oksigen alami pada selulosa dan lignin membantu proses oksidasi tanpa memerlukan bahan kimia keras dalam jumlah besar, sehingga menjadikan

metode ini lebih ramah lingkungan. Berbagai jenis biomassa telah terbukti potensial digunakan, seperti sekam padi yang kaya silika dan karbon, tempurung kelapa dengan kadar karbon tinggi serta porositas alami yang baik, kulit kopi yang memiliki kandungan lignin melimpah untuk menghasilkan karbon aromatik stabil, serta ampas tebu merupakan biomassa yang kaya akan lignoselulosa, terdiri atas selulosa, hemiselulosa dan lignin, yang menjadikannya bahan baku potensial untuk dikonversi menjadi karbon melalui proses pirolisis (Solihudin *et al.*, 2020; Noprianti *et al.*, 2024; Safian *et al.*, 2020).

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber karbon untuk sintesis GO tidak hanya mengurangi ketergantungan terhadap sumber grafit alam, tetapi juga berkontribusi terhadap pengelolaan limbah pertanian dan penerapan ekonomi sirkular. Dengan potensi ketersediaannya yang besar, sifatnya yang dapat diperbarui, serta kandungan karbon tinggi, biomassa menjadi alternatif ideal untuk menghasilkan material karbon fungsional yang berkelanjutan, mendukung inovasi teknologi hijau dan sejalan dengan tujuan pembangunan berkelanjutan.

2.3 Status Penelitian GO dari Biomassa

Penelitian mengenai GO berbasis biomassa telah mengalami perkembangan pesat dalam satu dekade terakhir. Berbagai studi global menunjukkan bahwa biomassa dapat digunakan secara efektif untuk menghasilkan GO dengan sifat fisik dan kimia yang kompetitif terhadap produk berbasis grafit konvensional. Menurut Zhu *et al.* (2016), proses konversi biomassa menjadi GO dapat dilakukan melalui tahapan pirolisis, aktivasi kimia dan oksidasi menggunakan agen oksidator seperti H_2O_2 atau asam askorbat. Pendekatan ini mampu menekan penggunaan bahan kimia berbahaya dan menurunkan emisi karbon selama proses sintesis.

Grafena oksida (GO) yang disintesis dari biomassa

pertanian seperti tongkol jagung, jerami padi, dan tempurung kelapa menunjukkan morfologi berlapis dengan luas permukaan tinggi serta kandungan gugus oksigen mencapai 25–35%, sebanding dengan GO hasil metode Hummers (Saha *et al.*, 2022; Tamilselvi *et al.*, 2020). Limbah tempurung kelapa (atau sekam kelapa) dapat dimanfaatkan sebagai prekursor untuk menyiapkan bahan graphene tereduksi (rGO) yang memiliki performa unggul untuk aplikasi superkapasitor bahan ini menunjukkan kapasitansi spesifik hingga 650 F g^{-1} pada 1 mV s^{-1} dalam elektrolit H_2SO_4 , dan siklus stabilitas yang tinggi, sehingga menegaskan potensi limbah kelapa sebagai kandidat untuk elektroda energi (Tatrari *et al.*, 2023).

Meskipun kemajuan signifikan telah dicapai, masih terdapat beberapa kesenjangan. Pertama, mekanisme pembentukan GO dari biomassa belum sepenuhnya dipahami, khususnya mengenai peran lignin dan selulosa dalam pembentukan domain karbon sp^2 selama proses oksidasi (Farid *et al.*, 2022). Kedua, konsistensi struktur dan reproduksibilitas GO dari berbagai jenis biomassa masih menjadi tantangan karena perbedaan komposisi kimia bahan baku (Safian *et al.*, 2020). Ketiga, penerapan pada skala industri masih terkendala oleh efisiensi energi, kontrol morfologi, serta biaya pemrosesan yang tinggi (Silva *et al.*, 2024).

Selain itu, peluang besar terbuka untuk meningkatkan performa GO berbasis biomassa melalui rekayasa struktur, misalnya dengan doping heteroatom (N, S, atau P), penggunaan katalis ramah lingkungan, serta penggabungan dengan material lain seperti polimer dan oksida logam untuk memperluas aplikasinya (Safian *et al.*, 2020; Saha *et al.*, 2022). Arah material masa depan disarankan berfokus pada pengembangan metode sintesis hijau yang terstandardisasi, peningkatan kontrol kualitas, serta evaluasi siklus hidup (LCA) guna memastikan keberlanjutan lingkungan dan ekonomi dari teknologi ini (Silva *et al.*, 2024).

3. BIOMASSA SEBAGAI BAHAN BAKU KARBON

Pemilihan Bahan Baku

Pemilihan bahan baku biomassa untuk produksi prekursor karbon atau GO harus didasarkan pada beberapa kriteria utama, yaitu kandungan karbon yang tinggi untuk memperoleh rendemen karbon optimal setelah pirolisis, ketersediaan bahan baku yang melimpah untuk menjamin kontinuitas pasokan, serta statusnya sebagai limbah non-pangan sehingga tidak bersaing dengan sumber pangan utama. Biomassa lignoselulosa seperti: sekam padi, tempurung kelapa, kulit kopi dan ampas tebu memenuhi kriteria tersebut karena memiliki kandungan karbon tetap yang tinggi serta komponen lignin, selulosa dan hemiselulosa yang dapat terkonversi menjadi karbon amorf melalui proses termal (Solihudin *et al.*, 2020; Noprianti *et al.*, 2024; Safian *et al.*, 2020).

Proses Awal Biomassa

Sebelum dikonversi menjadi prekursor grafitik atau GO, biomassa umumnya melalui tahap pra-pengolahan: pembersihan untuk menghilangkan kotoran/garam anorganik, pengeringan untuk menurunkan kadar air, dan penggilingan untuk menstandarkan ukuran partikel. Tahap kunci berikutnya adalah pirolisis/karbonisasi pada kisaran suhu yang dirancang (biasanya 400–800°C) di bawah kondisi inert; proses ini menghilangkan komponen volatil dan membentuk struktur karbon amorf/terkarbonisasi dengan porositas dasar yang berguna bagi aktivasi berikutnya (Rhomadoni *et al.*, 2024). Peningkatan luas permukaan dan mikropori yang diperlukan pada banyak aplikasi, dilakukan aktivasi kimia (misalnya KOH, H_3PO_4 , $ZnCl_2$) atau aktivasi fisik (uap/ CO_2), kedua pendekatan ini memiliki *trade-off* terkait energi, residu kimia dan biaya.

Potensi Biomassa Lokal Indonesia

Indonesia memiliki beragam limbah biomassa yang memenuhi kriteria sebagai prekursor karbon berdaya guna tinggi. Sekam padi tersedia dalam volume besar di wilayah

pertanian dan dikenal memiliki kandungan abu (silika) yang relatif tinggi sehingga memerlukan langkah desilifikasi bila ditargetkan menuju grafitik/GO berkualitas tinggi, namun setelah pengolahan yang tepat, sekam padi dapat menghasilkan karbon berpori dengan luas permukaan besar untuk aplikasi adsorpsi dan sebagai prekursor material karbon fungsional (Solihudin *et al.*, 2020). Tempurung kelapa mempunyai kandungan karbon yang tinggi dan porositas alami sehingga banyak studi nasional mengidentifikasi tempurung kelapa sebagai kandidat kuat untuk produksi arang aktif dan bahan karbon bernilai tambah. Kulit ari kedelai dan tongkol/tangkai jagung merupakan contoh limbah agroindustri lain yang komposisinya kaya lignoselulosa sehingga potensial untuk dikonversi menjadi karbon aromatik stabil yang dapat dioksidasi menjadi GO atau rGO untuk aplikasi energi dan lingkungan. Berbagai aplikasi di Indonesia telah menunjukkan kemampuan bahan-bahan ini untuk menghasilkan arang/karbon aktif dengan karakteristik yang dapat dimodifikasi melalui kondisi pirolisis dan aktivasi, sehingga potensi skala lokal dan rantai pasoknya menjanjikan untuk industrialisasi tahap awal.

Aspek Keberlanjutan dan Nilai Tambah

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku GO tidak hanya berkontribusi pada pengembangan material berkelanjutan, tetapi juga memberikan dampak positif terhadap lingkungan dan ekonomi. Pengolahan limbah pertanian menjadi karbon berfungsi mengurangi akumulasi limbah organik yang berpotensi mencemari lingkungan, sekaligus meningkatkan nilai tambah melalui penerapan ekonomi sirkular. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *green chemistry* yang menekankan efisiensi energi, penggunaan bahan ramah lingkungan, serta minimalisasi limbah selama proses. Dengan demikian, pemanfaatan biomassa lokal Indonesia sebagai sumber karbon tidak hanya mendukung keberlanjutan, tetapi juga membuka peluang industri berbasis material hijau di masa depan.

4. SINTESIS GO DARI BIOMASSA

Prinsip Kimia Oksidasi

Sintesis GO dari biomassa berawal dari konversi bahan karbon amorf hasil pirolisis menjadi struktur lembaran grafitik yang teroksidasi sebagian. Prinsip utamanya adalah reaksi oksidasi kimia yang memperkenalkan gugus fungsional oksigen seperti hidroksil ($-OH$), epoksi ($C-O-C$), karbonil ($C=O$), dan karboksil ($-COOH$) ke dalam kisi karbon sp^2 . Reaksi ini menyebabkan gangguan pada jaringan aromatik planar grafitik dan meningkatkan sifat hidrofilik serta kemampuan dispersi dalam pelarut polar (Yuliana *et al.*, 2024).

Pada proses ini, oksidator kuat seperti kalium permanganat ($KMnO_4$), natrium nitrat ($NaNO_3$), atau hidrogen peroksid (H_2O_2) dalam media asam pekat (biasanya H_2SO_4 atau campuran $H_2SO_4-H_3PO_4$) digunakan untuk memutus sebagian ikatan $C=C$ dan menggantikannya dengan gugus oksigen. Pada prekursor berbasis biomassa, kehadiran atom hetero (O, N, S) dan struktur lignoselulosa dapat mempercepat interkalasi oksidator serta mempermudah proses delaminasi lembaran karbon, menghasilkan dispersi GO yang baik dalam air. Oleh karena itu, karakteristik kimia bahan karbon biomassa memberikan keunggulan intrinsik dalam efisiensi oksidasi dibandingkan grafit mineral konvensional.

Beberapa Metode Sintesis

a. Metode Hummers dan Modifikasinya

Metode Hummers merupakan pendekatan klasik yang paling luas digunakan untuk sintesis GO. Prosedur ini melibatkan reaksi grafit dengan campuran oksidator $KMnO_4$, $NaNO_3$, dan H_2SO_4 pekat pada suhu terkontrol (biasanya $<50^\circ C$). Oksidasi menghasilkan permukaan kaya gugus fungsional dan warna endapan berubah menjadi cokelat keemasan, menandakan terbentuknya GO.

Namun, metode asli memiliki beberapa kelemahan:

pelepasan gas NO_2 dan N_2O_4 yang beracun dari NaNO_3 , serta produksi limbah asam tinggi. Untuk itu, dikembangkan Modified Hummers Method yang menghilangkan NaNO_3 dan mengganti sebagian asam dengan H_3PO_4 agar reaksi lebih ramah lingkungan dan menghasilkan GO dengan derajat oksidasi yang lebih seragam.

Dalam konteks bahan biomassa, metode modifikasi ini lebih sesuai karena struktur karbon amorf hasil pirolisis lebih reaktif terhadap oksidasi, sehingga konsumsi oksidator dapat dikurangi. Karbon dari tempurung kelapa dan sekam padi dapat berhasil dioksidasi menjadi GO menggunakan variasi metode Hummers dengan hasil derajat oksidasi tinggi dan dispersi stabil (Putri & Supardi, 2023).

b. Metode Hidrotermal

Metode hidrotermal melibatkan perlakuan biomassa atau prekursor grafit dalam larutan tertutup pada suhu dan tekanan tinggi. Proses ini memungkinkan reduksi dan oksidasi terkendali sehingga menghasilkan GO dengan struktur dan sifat yang diinginkan. Metode ini dikenal ramah lingkungan dan hemat energi karena dapat menggunakan air sebagai pelarut dan tidak membutuhkan bahan kimia beracun dalam jumlah besar. Keuntungan lain adalah kemampuan untuk melakukan reduksi GO secara bersamaan selama proses sintesis, mempercepat pembentukan produk akhir.

c. Metode Solvotermal dan Microwave-Assisted

Metode solvotermal serupa dengan hidrotermal tetapi menggunakan pelarut organik, memberikan kontrol lebih baik pada ukuran dan morfologi GO. Sementara itu, metode microwave-assisted memanfaatkan energi gelombang mikro untuk memanaskan reaktan secara cepat dan seragam, memungkinkan sintesis GO yang lebih cepat dan efisien. Microwave-assisted juga dapat mengontrol kristalisasi dan ukuran partikel, menghasilkan GO dengan kualitas tinggi serta ukuran yang seragam. Kombinasi metode solvotermal dengan

microwave-assisted semakin populer untuk sintesis GO dari biomassa karena pengoperasian yang mudah dan hasil yang konsisten (Allende *et al.*, 2024).

Parameter Operasi

Proses sintesis GO dari biomassa sangat dipengaruhi oleh parameter operasi seperti konsentrasi oksidator, suhu dan waktu reaksi, yang secara signifikan menentukan morfologi, kandungan gugus fungsional, dan tingkat oksidasi material. Konsentrasi oksidator seperti kalium permanganat (KMnO_4) merupakan faktor utama yang mengontrol derajat oksidasi karbon. Kalium permanganat mengoksidasi asam oksalat menjadi CO_2 (karbon dioksida) dan H_2O sehingga memecah kalium permanganate menjadi mangan oksida (Nurrahmajanti *et al.*, 2023).

Selain itu, suhu reaksi juga berperan penting dalam menentukan laju reaksi oksidasi, dimana suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan reaksi eksotermik yang tidak terkendali dan merusak struktur GO, sedangkan suhu yang terlalu rendah bisa memperlambat reaksi sehingga proses menjadi kurang efisien. Waktu reaksi juga memengaruhi tingkat oksidasi dan eksfoliasi lapisan grafena, durasi yang optimal menjamin proses oksidasi yang cukup tanpa degradasi material (Saron *et al.*, 2025). Oleh karena itu, penyesuaian parameter ini secara tepat sangat penting untuk memperoleh GO dengan karakteristik yang diinginkan dari biomassa sebagai bahan baku.

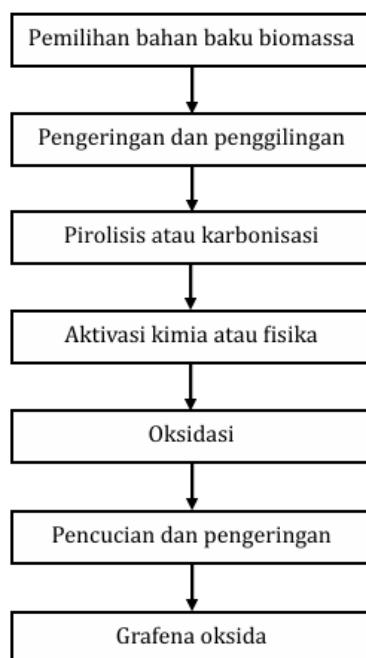
Pengendalian Lingkungan

Dalam proses sintesis GO konvensional, penggunaan bahan kimia seperti kalium permanganat (KMnO_4) dan asam sulfat (H_2SO_4) menimbulkan permasalahan lingkungan dan risiko keselamatan. Oleh karena itu, upaya pengendalian lingkungan diarahkan pada pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya tersebut dengan mengganti sebagian bahan kimia menggunakan metode *green synthesis* yang lebih ramah

lingkungan. Pendekatan *green synthesis* ini menggunakan prekursor biomassa alami dan pelarut yang lebih aman, serta memanfaatkan teknik hidrotremal dan *microwave-assisted* untuk mengurangi limbah dan konsumsi energi (Allende *et al*, 2024).

Skema Proses

Sintesis GO dari biomassa melibatkan serangkaian tahapan proses yang sistematis untuk mengkonversi material lignoselulosa menjadi material karbon berlapis dengan gugus fungsi oksigen. Pendekatan sintesis dapat diklasifikasikan menjadi metode top-down yang memisahkan grafit menjadi lembaran tunggal, atau metode bottom-up yang membangun grafena dari molekul karbon sebagai blok penyusun (Silva *et al.*, 2024). Berikut adalah diagram alir dan penjelasan tahapan pembuatan GO dari biomassa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.

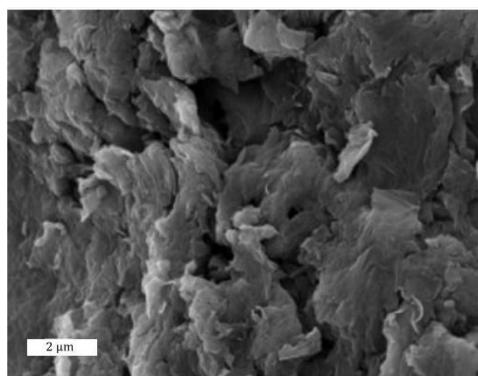


Gambar 2. Skema Proses Pembuatan GO

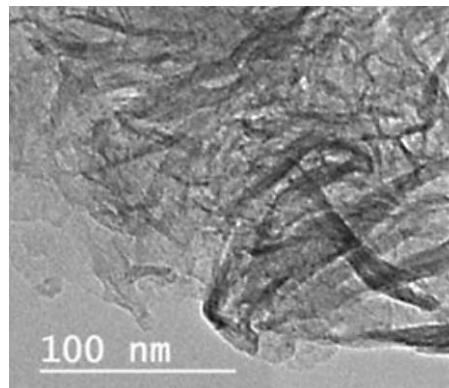
5. KARAKTERISASI GO

Morfologi dan Struktur

Karakterisasi morfologi GO umumnya dilakukan menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Secara morfologi, citra SEM menunjukkan bahwa graphene oxide (GO) memiliki struktur berlapis (*lamellar structure*) dengan lembaran yang tidak beraturan, bergelombang, dan sebagian terkelupas (Das *et al.*, 2024). Lembaran-lembaran tersebut tampak saling tumpang tindih dan membentuk agregat berpori, menandakan karakter khas material berbasis grafena yang telah teroksidasi. Struktur seperti ini memperlihatkan permukaan kasar dan berlipat-lipat, yang menunjukkan adanya deformasi akibat proses oksidasi dan eksfoliasi pada grafit asalnya. (Silva *et al.*, 2024). TEM/HRTEM mengonfirmasi adanya *single* atau *few-layer sheets* yang cenderung polikristalin untuk sampel biomassa. Morfologi khas GO dengan tampilan berupa lembaran tipis bergelombang (*wrinkled and folded sheets*) yang saling tumpang tindih. Pada skala 100 nm, GO terdiri atas lembaran transparan dengan kontras rendah (Ghanem *et al.*, 2020), menunjukkan bahwa material ini merupakan single-layer hingga few-layer GO ditunjukkan pada Gambar 4.

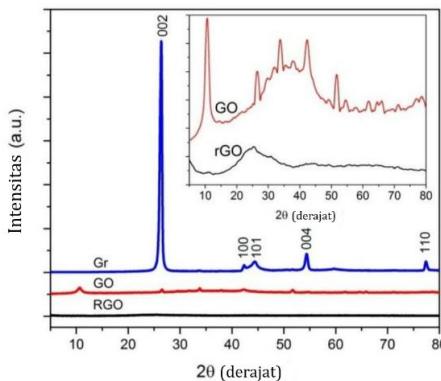


Gambar 3. Morfologi SEM dari Graphite powder yang disintesis
(Das *et al.*, 2024)

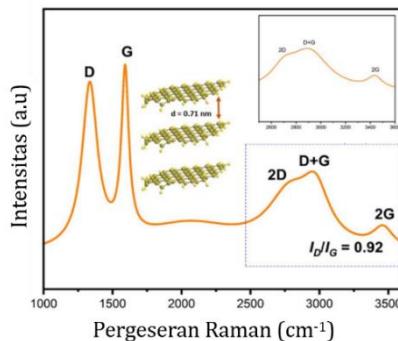


Gambar 4. *TEM images* untuk GO
(Ghanem *et al.*, 2020)

Dalam XRD, GO dari limbah menampilkan puncak bergeser dari puncak grafit ($\sim 2\theta \approx 26-26.6^\circ$) ke daerah $\sim 2\theta = 9-13^\circ$ (d-spacing $\sim 0,70-0,86$ nm) yang menandakan interkalasi gugus oksigen, contohnya puncak $12,47^\circ$ ($d=0.71$ nm) untuk GO dari daun kering tebu dan puncak 10.8° ($d\approx0.86$ nm) untuk GO ditunjukkan pada Gambar 5. Sementara itu, Raman menunjukkan dua pita utama: pita D ($\sim 1350\text{ cm}^{-1}$) dan pita G ($\sim 1580\text{ cm}^{-1}$), yang menggambarkan tingkat cacat dan keteraturan sp^2 karbon. Rasio intensitas ID/IG yang meningkat ($\approx 1,0-1,2$) menunjukkan bahwa struktur karbon telah mengalami oksidasi signifikan, tetapi masih mempertahankan sebagian domain sp^2 ditunjukkan pada Gambar 6. (Thangaraj *et al.*, 2023).



Gambar 5. XRD *patterns* dari grafit, GO, dan rGO
(Mansoori Mosleh *et al.*, 2019)

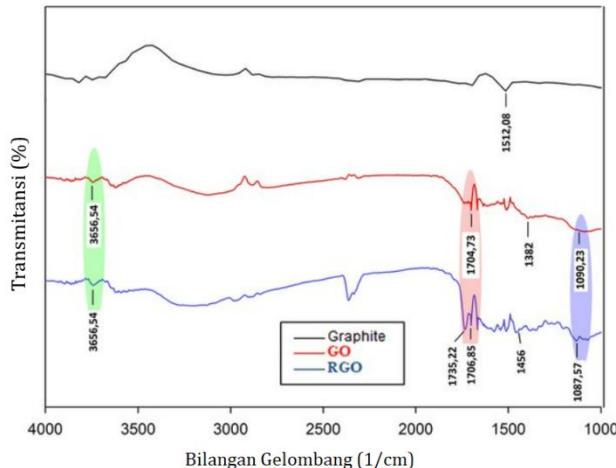


Gambar 6. Spektrum Raman dari GO
(Thangaraj *et al.*, 2023)

Gugus Fungsional

Keberadaan gugus oksigen pada permukaan GO dapat diidentifikasi melalui *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR). Analisis FTIR pada GO limbah konsisten menampilkan pita karakteristik gugus oksigen: pita broad $3000\text{--}3700 \text{ cm}^{-1}$ ($-\text{OH}$ teradsorpsi), pita $\sim 1630\text{--}1720 \text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}=\text{O}$ /karboksilat), dan pita $\sim 1050\text{--}1385 \text{ cm}^{-1}$ ($\text{C}-\text{O}$ epoksi/alkohol) ditunjukkan pada Gambar 7. Spektrum FTIR menunjukkan bahwa GO memiliki puncak kuat pada 3416 cm^{-1} ($-\text{OH}$), 1725 cm^{-1} ($\text{C}=\text{O}$), dan 1057 cm^{-1} ($\text{C}-\text{O}$), menandakan keberadaan gugus fungsional oksigen hasil oksidasi grafit. Intensitas puncak tersebut berkurang pada RGO, menunjukkan keberhasilan

reduksi dan penghilangan sebagian gugus oksigen. Dengan demikian, transformasi dari grafit \rightarrow GO \rightarrow RGO terkonfirmasi melalui perubahan karakteristik gugus fungsional pada spektrum FTIR.



Gambar 7. Gugus Fungsional FT-IR pada GO

(Wijaya *et al.*, 2020)

Luas Permukaan dan Porositas

Luas permukaan spesifik GO diukur dengan Brunauer Emmett Teller (BET) *surface area* analisis. GO dari biomassa menunjukkan ukuran pori (Tabel 1) tergantung prekursor dan perlakuan aktivasi; contohnya GO dilaporkan memiliki luas permukaan ~ 37.4 m^2/g , sementara sampel biochar/GO yang diaktivasi atau diolah khusus dapat memiliki luas yang lebih tinggi ditunjukkan pada Gambar 5 (Hassanin *et al.*, 2022). Porositas (mikro/meso) penting, dominasi pori meso (2–50 nm) sering dilaporkan untuk GO biomassa yang berguna untuk aplikasi adsorpsi polutan besar dan material elektroda (superkapasitor) karena memfasilitasi difusi ion/molekul. Oleh karena itu, pemilihan kondisi pirolisis/aktivasi sangat menentukan performa aplikasi.

Tabel 1. Analisis BET dan ukuran pori pada GO dari Zn-C battery rods

(Hassanin *et al.*, 2022)

Bahan	Luas permukaan (BET, m^2/g)	Ukuran pori, nm
GO	37,37	3,19
SiO ₂	25,89	2,87
SiO ₂ /GO	35,45	2,99

Sifat Optik dan Termal

Spektrum UV-Vis digunakan untuk mengidentifikasi puncak serapan, dimana GO hasil sintesis dari limbah umumnya menampilkan puncak serapan $\pi \rightarrow \pi^*$ sekitar ~ 230 nm dan bahan $n \rightarrow \pi^*$ dekat ~ 300 nm, yang merefleksikan adanya domain sp^2 dan gugus C=O; pola ini digunakan sebagai pemeriksaan cepat keberhasilan oksidasi dan derajat reduksi/rekonstruksi aromatik. TGA/DSC memperlihatkan pola degradasi bertahap: kehilangan massa pertama (air/gugus labile) di bawah ~ 200 °C dan dekomposisi gugus oksigen lebih lanjut pada rentang suhu yang lebih tinggi; kerangka karbon relatif stabil sampai beberapa ratus tergantung derajat oksidasi. Profil termal ini mirip dengan GO konvensional, namun suhu dan besaran kehilangan massa dapat bergeser bergantung impurities atau sisa-sublimat dari prekursor limbah (Silva *et al.*, 2024).

Interpretasi Data dan Perbandingan

Secara keseluruhan, GO yang disintesis dari biomassa memperlihatkan karakteristik struktural dan kimia yang sebanding dengan GO dari grafit komersial. GO biomassa umumnya memiliki derajat oksidasi lebih tinggi, porositas lebih besar dan stabilitas dispersi yang baik, tetapi cenderung memiliki kristalinitas yang lebih rendah dan konduktivitas

listrik sedikit lebih kecil (Silva *et al.*, 2024). Namun, dengan modifikasi pasca-sintesis seperti: reduksi termal atau kimia, GO biomassa mampu mencapai konduktivitas hingga 10^3 – 10^4 S/m, menjadikannya kandidat potensial untuk aplikasi energi, superkapasitor, dan elektroda baterai (Thangaraj *et al.*, 2023).

6. APLIKASI GO DARI BIOMASSA

Bidang Energi

GO berbasis biomassa memiliki potensi besar sebagai bahan elektroda untuk superkapasitor dan baterai karena konduktivitas listrik yang tinggi, luas permukaan spesifik besar dan kehadiran gugus oksigen fungsional yang mendukung penyimpanan ion. Struktur lamela GO dari biomassa mempermudah pergerakan ion elektrolit sehingga meningkatkan kapasitansi dan stabilitas siklus. Selain itu, dalam sel bahan bakar dan sistem konversi energi, GO berperan sebagai katalis pendukung yang mampu meningkatkan transfer elektron serta menurunkan resistansi internal. Penggunaan bahan baku biomassa seperti sekam padi atau tempurung kelapa juga menurunkan biaya produksi serta mendukung keberlanjutan rantai pasok energi hijau (Nurhayati., 2024).

Bidang Lingkungan

Dalam bidang lingkungan, GO dari biomassa banyak diaplikasikan sebagai fotokatalis untuk degradasi senyawa organik berbahaya. Kombinasi GO dengan TiO₂ atau ZnO mampu meningkatkan efisiensi fotokatalitik karena struktur GO memfasilitasi pemisahan muatan elektron-hole dan memperluas penyerapan cahaya. Selain itu, GO juga berfungsi sebagai adsorben logam berat dan pewarna industri, dengan kapasitas adsorpsi tinggi terhadap Pb²⁺, Cd²⁺, dan metilen biru melalui interaksi elektrostatik dan gugus karboksil aktif. Pendekatan ini tidak hanya meningkatkan efektivitas pengolahan limbah, tetapi juga mengurangi ketergantungan

pada bahan kimia sintetis yang berbahaya bagi lingkungan.

Bidang Sensor dan Elektronika

GO berbasis biomassa memiliki potensi besar dalam pengembangan sensor gas dan biosensor karena sifat permukaan yang luas dan reaktif secara kimia. GO dapat dimodifikasi untuk mendeteksi berbagai gas berbahaya dengan sensitivitas tinggi serta aplikasi biosensor untuk deteksi biomolekul dalam bidang medis dan lingkungan. Metode produksi berbasis biomassa menghasilkan GO yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk aplikasi sensor elektronik.

Bidang Biomedis

Dalam bidang biomedis, GO menunjukkan sifat antimikroba yang efektif serta kemampuan sebagai pembawa obat yang dapat ditargetkan dengan baik ke jaringan spesifik. Selain itu, GO dapat dikombinasikan dengan bahan biokompatibel untuk menghasilkan material komposit yang aman untuk aplikasi implan dan pengobatan (Saron *et al.*, 2025). Penggunaan GO dari biomassa meningkatkan keberlanjutan dan potensi komersial produk di bidang kesehatan.

Prospek Komersialisasi dan Skalabilitas

Pengembangan GO dari biomassa menunjukkan prospek komersialisasi yang semakin terbuka, seiring meningkatnya permintaan material karbon berkelanjutan di pasar global. Tantangan utama meliputi konsistensi kualitas produk, efisiensi sintesis berskala besar, dan pengurangan biaya produksi. Di Indonesia, potensi sumber biomassa yang melimpah seperti limbah pertanian dan perkebunan menjadi keunggulan kompetitif untuk produksi GO dalam skala industri. Dengan dukungan kebijakan ekonomi hijau dan riset berkelanjutan, GO berbasis biomassa berpotensi menjadi material strategis dalam transisi menuju industri ramah lingkungan.

7. TANTANGAN DAN PROSPEK MASA DEPAN

Prospek Komersialisasi dan Skalabilitas

Meskipun potensi GO berbasis biomassa sangat menjanjikan, terdapat sejumlah tantangan teknis dan ekonomi yang masih harus diatasi. Salah satu kendala utama adalah reproduksibilitas dan konsistensi kualitas produk, mengingat sifat biomassa yang bervariasi tergantung pada jenis, asal dan perlakuan awal bahan baku (Pratiwi *et al.*, 2024). Variasi ini berpengaruh terhadap struktur karbon, kandungan abu, dan rasio C/O yang menentukan hasil oksidasi. Selain itu, efisiensi oksidasi pada metode konvensional seperti Hummers masih rendah, dengan konversi karbon aktif menjadi GO sering kali tidak mencapai 70% karena terbatasnya difusi oksidator ke dalam pori karbon.

Dari sisi ekonomi, biaya produksi menjadi tantangan besar dalam upaya komersialisasi GO dari biomassa. Meskipun bahan bakunya murah, proses sintesis memerlukan energi dan bahan kimia yang cukup besar. Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi teknologi reaktor berskala industri dengan efisiensi energi tinggi dan sistem daur ulang pelarut untuk menekan biaya operasional.

Pengembangan Metode Sintesis Hijau

Salah satu arah penting pengembangan GO dari biomassa adalah penerapan metode sintesis hijau (*green synthesis*) yang berorientasi pada keamanan lingkungan dan efisiensi sumber daya. Upaya ini meliputi penggunaan pelarut alami seperti: air, etanol, atau asam organik, serta agen oksidasi ramah lingkungan seperti H_2O_2 , asam askorbat, atau ekstrak tumbuhan yang memiliki sifat reduktif. Pendekatan ini terbukti dapat menurunkan emisi limbah kimia dan meningkatkan keamanan kerja tanpa mengorbankan kualitas GO yang dihasilkan.

Selain itu, pengembangan metode hidrotermal dan solvotermal dengan energi rendah menjadi alternatif menarik

karena tidak memerlukan bahan kimia berbahaya dan dapat dilakukan dalam sistem tertutup yang ramah lingkungan. Penggunaan *mikrowave-assisted synthesis* juga mulai diterapkan untuk mempercepat proses oksidasi dengan kontrol suhu yang lebih baik dan konsumsi energi yang minimal (Allende *et al*, 2024).

Integrasi dengan Konsep *Circular Economy*

Pemanfaatan biomassa sebagai bahan baku karbon untuk GO sejalan dengan prinsip *circular economy*, yang menekankan pada pemanfaatan limbah sebagai sumber daya baru. Limbah pertanian seperti: sekam padi, tongkol jagung, kulit kopi dan ampas tebu memiliki potensi besar untuk dijadikan sumber karbon dalam produksi material bernilai tambah (Putri *et al.*, 2025). Pendekatan ini tidak hanya mengurangi jumlah limbah organik yang mencemari lingkungan, tetapi juga membuka peluang ekonomi baru di sektor industri kecil dan menengah. Dengan demikian, produksi GO dari biomassa dapat menjadi model pengembangan industri material yang tidak hanya efisien tetapi juga bertanggung jawab secara ekologis dan sosial.

Arah Pengembangan

Arah masa depan GO dari biomassa diarahkan pada pengembangan material nano-komposit dan hibrid untuk meningkatkan performa aplikatifnya. Kombinasi GO dengan logam seperti: Ag, Cu, dan Fe_3O_4 dapat meningkatkan sifat konduktivitas, magnetik, dan aktivitas katalitiknya. Selain itu, penelitian juga diarahkan pada rekayasa permukaan GO untuk aplikasi biomedis, termasuk sistem penghantaran obat (*drug delivery system*) dan sensor biologis presisi tinggi. Pendekatan multidisipliner antara bidang kimia material, bioteknologi dan teknik lingkungan akan menjadi kunci untuk mempercepat pengembangan material berbasis GO yang fungsional, aman dan berkelanjutan di masa depan.

PENUTUP

Grafen dari biomassa merupakan inovasi material berkelanjutan yang memadukan efisiensi Sumber Daya Alam (SDA) dengan teknologi ramah lingkungan. Melalui pemanfaatan limbah pertanian seperti: sekam padi, ampas tebu, tempurung kelapa dan tongkol jagung, proses sintesis GO dapat dilakukan secara efektif menggunakan metode kimia dan fisik seperti: Hummers termodifikasi, hidrotermal, serta *microwave-assisted*. Hasil karakterisasi menunjukkan bahwa GO berbasis biomassa memiliki morfologi berlapis, luas permukaan tinggi, serta sifat optik dan konduktivitas yang kompetitif dibandingkan GO dari grafit komersial. Pengembangan material ini tidak hanya mendukung ekonomi sirkular dan pengurangan limbah, tetapi juga membuka peluang besar untuk aplikasi di bidang energi, katalis dan teknologi lingkungan, menjadikannya fondasi penting bagi masa depan material hijau yang berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Allende, S., Liu, Y., Zafar, M. A., & Jacob, M. V. (2024). Synthesis and application of biomass-based graphene oxide using microwave-assisted pyrolysis method. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 40, 101338.
- Das, A., Mondal, D., Panda, B., & Mondal, S. (2024). Fabrication of alumina decorated graphene oxide nanocomposite for efficient removal of aqueous phosphate. *Inorganic and Nano-Metal Chemistry*, 54 (9), 887-897.
- Farid, M. A. A., & Andou, Y. (2022). A route towards graphene from lignocellulosic biomass: technicality, challenges, and their prospective applications. *Journal of Cleaner Production*, 380, 135090.
- Ghanem, A. F., Youssef, A. M., & Abdel Rehim, M. H. (2020). Hydrophobically modified graphene oxide as a barrier and antibacterial agent for polystyrene packaging. *Journal of Materials Science*, 55 (11), 4685-4700.
- Gutierrez-Cruz A, Ruiz-Hernández AR, Vega-Clemente JF, LunaGazcón DG, Campos-Delgado J (2022) A review of top-down and bottom-up synthesis methods for the

- production of graphene, graphene oxide and reduced graphene oxide. *J Mater Sci* 57:14543-14578
- Hassanin M. A, Negm S. H., Youssef MA, Sakr AK, Mira HI, Mohammaden TF, Al-Otaibi JS, Hanfi MY, Sayyed MI, Cheira MF (2022) Sustainable Remedy Waste to Generate SiO₂ Functionalized on Graphene Oxide for Removal of U(VI) Ions. *Sustainability* 14:2699
- Kumila, B. N., & Liu, C. (2017). Analisa pengaruh reduksi termal terhadap kerusakan struktur (structural-disorder) pada lapisan tipis graphene oxide tereduksi. *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 2 (1), 67-74.
- Liu, C., & Zhang, Y. (2020). Sustainable functional materials for energy and environment. *Advanced Materials*, 32 (45), 2001996.
- Maroulas, K. N., Karakotsou, A., Poulopoulos, S. G., Konstantinou, I., Ladomenou, K., & Kyzas, G. Z. (2024). Graphene adsorbents and photocatalysts derived from agricultural wastes: a review. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 8, 100166.
- Mansoori Mosleh, F., Mortazavi, Y., Hosseinpour, N., & Khodadadi, A. A. (2019). Asphaltene adsorption onto carbonaceous nanostructures. *Energy & Fuels*, 34 (1), 211-224.
- Nguyen, A. Q., & Trinh, L. T. P. (2022). Thermochemical conversion of cellulose and hemicellulose. In *Biomass utilization: Conversion strategies* (pp. 107-131). Cham: Springer International Publishing.
- Noprianti, N. S. A., Hamdi, H., & Sudiar, N. Y. (2024). Analisis Pemanfaatan Biobriket Dari Limbah Kulit Kopi Sebagai Basis Pengembangan Energi Terbarukan: Artikel Review. *Journal of Applied Mechanical Engineering and Renewable Energy*, 4 (2), 1-9.
- Nurhayati, S. F. (2024). Produksi Pembuatan Briket Arang Dari Pengolahan Limbah Tempurung Kelapa Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Determinasi: Jurnal Penelitian Ekonomi Manajemen dan Akuntansi*, 2 (2), 47-55.
- Nurrahmajanti, A. N., Ramadhani, S., & Mulyani, R. W. E. (2023). Pengaruh Oksidasi Kalium Permanganat terhadap Hasil Pre-Treatment Kain Polyester-Kapas (65%-35%). *Texere*, 21(2), 123-130.

- Plenca, K., Cvetnić, S., Prskalo, H., Kovačić, M., Cvetnić, M., Kušić, H., ... & Lončarić Božić, A. (2023). Biomass pyrolysis-derived biochar: a versatile precursor for graphene synthesis. *Materials*, 16(24), 7658.
- Pratiwi, I., Miarti, A., Setiorini, I. A., Kurniasari, D., & Kusniawati, E. (2024). *Teknik Bioenergi*. PT. Sonpedia Publishing Indonesia.
- Purwandari, V., Harahap, M., Hamid, M., Laia, A., & Lase, W. J. I. W. (2023). *Inovasi Revolusioner Elektrokatalis Berbasis Grafena Batubara*. Deepublish.
- Putri, R. E. D., Lestari, D. I., Sari, D. A., Putri, Z. P., & Maliki, S. (2025). Potential of Biomass Raw Material for Biochar Production: A Review: Potensi Bahan Baku Biomassa Untuk Produksi Biochar: Tinjauan. *Chemical Engineering Journal Storage (CEJS)*, 5 (04), 528-553.
- Putri, N. A., & Supardi, Z. A. I. (2023). Sintesis Dan Karakterisasi Graphene Oxide (Go) Dari Bahan Alam Tempurung Kelapa: Kata Kunci: Graphene Oxide, Tempurung Kelapa, Metode Hummer. *Inovasi Fisika Indonesia*, 12 (2), 47-55.
- Rahman, M. M., Hasan, M. A., & Islam, M. T. (2023). Recent advances in biomass-derived graphene materials: synthesis and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 180, 113208.
- Rhomadoni, F. R., Jamilatun, S., Idris, M., & Setyawan, M. (2024). Mekanisme dan Aplikasi Pirolisis Biomassa Dalam Produksi Biochar, Bio-Oil dan Gas Pirolisis. Seminar Nasional Inovasi dan Teknologi (SEMNASINTEK), 54-68.
- Safian, M. T. U., Haron, U. S., & Ibrahim, M. M. (2020). A review on bio-based graphene derived from biomass wastes. *BioResources*, 15 (4), 9756.
- Saha, J. K., & Dutta, A. (2022). A review of graphene: material synthesis from biomass sources. *Waste and Biomass Valorization*, 13 (3), 1385-1429.
- Saron, M., Wahyuni, D., & Arman, Y. (2025). Reduksi Termal Oksida Grafena Berbasis Tandan Kosong Kelapa Sawit: Sintesis dan Aplikasinya sebagai Adsorben Metilen Biru. *POSITRON*, 15 (1), 59-69.
- Silva, W. C. H., Zafar, M. A., Allende, S., Jacob, M. V., & Tuladhar, R. (2024). Sustainable synthesis of graphene oxide from waste sources: a comprehensive review of methods and

- applications. *Materials Circular Economy*, 6 (1), 23.
- Singh, R. K., Kumar, R., & Singh, D. P. (2016). Graphene oxide: strategies for synthesis, reduction and frontier applications. *Rsc Advances*, 6 (69), 64993-65011.
- Solihudin, S., Rustaman, R., & Haryono, H. (2020). Pembentukan karbon konduktif dari sekam padi dengan metode hidrotermal menggunakan larutan kalium karbonat. *Chimica et Natura Acta*, 8 (1), 42-49.
- Syed 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) * Open Access. *Graphene* 6:1-18
- Tamilselvi, R., Ramesh, M., Lekshmi, G. S., Bazaka, O., Levchenko, I., Bazaka, K., & Mandhakini, M. (2020). Graphene oxide-Based supercapacitors from agricultural wastes: A step to mass production of highly efficient electrodes for electrical transportation systems. *Renewable Energy*, 151, 731-739.
- Tratrari, G., Tewari, C., Pathak, M., Bhatt, D., Solanki, M., Shah, F. U., & Sahoo, N. G. (2023). Coconut-husk derived graphene for supercapacitor applications: comparative analysis of polymer gel and aqueous electrolytes. *Materials Advances*, 4 (15), 3310-3322.
- Thangaraj, B., Mumtaz, F., Abbas, Y., Anjum, D. H., Solomon, P. R., & Hassan, J. (2023). Synthesis of graphene oxide from sugarcane dry leaves by two-stage pyrolysis. *Molecules*, 28 (8), 3329.
- Wang, C., Zhang, J., & Chen, B. (2021). Biomass-derived carbon materials for sustainable energy storage and conversion. *Journal of Energy Chemistry*, 59, 379–397.
- Wijaya, R., Andersan, G., Permatasari Santoso, S., & Irawaty, W. (2020). Green reduction of graphene oxide using kaffir lime peel extract (*Citrus hystrix*) and its application as adsorbent for methylene blue. *Scientific reports*, 10 (1), 667.
- Yuliana, Y., Jonuarti, R., Jhora, F. U., & Hidayat, R. (2024). Pengaruh Ukuran Partikel Zno terhadap Struktur dan Sifat Elektronik Nanokomposit Zno/Graphene Oxide sebagai Kandidat Katalis Solar Cell. *Phydagogic: Jurnal Fisika dan Pembelajarannya*, 7 (1), 16-22.

- Zhu, Y., Murali, S., Cai, W., Li, X., Suk, J. W., Potts, J. R., & Ruoff, R. S. (2016). Graphene and graphene oxide: Synthesis, properties, and applications. *Advanced Materials*, 22 (35), 3906–3924.
- Zhu, J., Wei, S., Ryu, J., Budhathoki, M., Liang, G., & Guo, Z. (2016). Development of biomass-derived carbon materials for energy storage applications. *Green Chemistry*, 18 (3), 602–618.