

Pengembangan dan Aplikasi Nanomaterial yang Dihasilkan di Indonesia untuk Teknologi Berkelanjutan, Sintesis, Karakteristik, dan Potensi Inovasi

Development and Application of Nanomaterials Produced in Indonesia for Sustainable Technology, Synthesis, Characteristics, and Innovation Potential

¹Aisyah Humairah ZM, ²Nissa Sukmawati

Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, UIN Sultan Thaha Saifuddin Jambi.
Jl. Jambi - Muara Bulian No.KM. 16, Simpang Sungai Duren, Kec. Jambi Luar Kota, Kabupaten
Muaro Jambi, Jambi 36361
e-mail: aisyahzmasda@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan nanomaterial berbasis sumber daya lokal Indonesia, seperti limbah biomassa dan mineral ilmenit, guna mendukung teknologi berkelanjutan di bidang pemurnian air, energi terbarukan, dan pengolahan limbah industri. Metode sintesis yang digunakan meliputi sol-gel, hidrotermal, dan pirolisis terkontrol, dengan karakterisasi menggunakan SEM, TEM, XRD, dan spektroskopi UV-Vis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biochar dari ampas tebu dan cangkang kelapa sawit efektif dalam adsorpsi logam berat, sementara TiO₂ dan ZnO berbasis ilmenit memiliki aktivitas fotokatalitik tinggi dalam degradasi polutan organik. Nanofluid yang mengandung MWCNT dan PEG meningkatkan konduktivitas termal baja, sedangkan nanokomposit NiO-TiO₂-CuO menunjukkan potensi sebagai anoda baterai lithium-ion. Kesimpulannya, nanomaterial berbasis bahan lokal Indonesia menawarkan solusi efisien dan ramah lingkungan untuk berbagai aplikasi teknologi berkelanjutan, meskipun tantangan terkait infrastruktur dan pendanaan riset masih perlu diatasi.

Kata Kunci: nanomaterial, biochar, nanofluid, teknologi berkelanjutan, MWCNT.

ABSTRACT

This research aims to develop nanomaterials based on local Indonesian resources, such as biomass waste and ilmenite minerals, to support sustainable technologies in the fields of water purification, renewable energy, and industrial waste treatment. The synthesis methods used include sol-gel, hydrothermal, and controlled pyrolysis, with characterization using SEM, TEM, XRD, and UV-Vis spectroscopy. The results showed that biochar from sugarcane bagasse and oil palm shells was effective in heavy metal adsorption, while ilmenite-based TiO₂ and ZnO had high photocatalytic activity in the degradation of organic pollutants. Nanofluids containing MWCNT and PEG improved the thermal conductivity of steel, while NiO-TiO₂-CuO nanocomposites showed potential as lithium-ion battery anodes. In conclusion, nanomaterials based on local Indonesian materials offer efficient and environmentally friendly solutions for various sustainable technology applications, although challenges related to infrastructure and research funding still need to be overcome.

Keywords: nanomaterials, biochar, nanofluid, sustainable technology, MWCNT.

PENDAHULUAN

Nanomaterial telah menjadi fokus utama dalam riset dan pengembangan teknologi modern, terutama karena kemampuannya yang unik dalam mendukung solusi berkelanjutan di berbagai bidang, seperti pemurnian air, energi terbarukan, dan pengolahan limbah industri. Secara global, nanomaterial menawarkan efisiensi tinggi dalam proses fotokatalitik, adsorpsi, serta peningkatan performa material dalam aplikasi teknologi canggih [1][2]. Di Indonesia, negara yang kaya akan sumber daya alam, pengembangan nanomaterial berbasis bahan lokal seperti limbah biomassa (ampas tebu, cangkang kelapa sawit) dan mineral seperti ilmenit merupakan peluang besar untuk menciptakan teknologi berkelanjutan yang ramah lingkungan dan ekonomis [3][4].

Pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan baku nanomaterial telah menunjukkan hasil yang menjanjikan, terutama dalam pembuatan biochar dan karbon aktif yang efektif untuk adsorpsi logam berat dan senyawa organik berbahaya dalam air limbah [5] [6]. Selain itu, nanomaterial berbasis titanium dioksida (TiO_2) dan seng oksida (ZnO) yang disintesis dari mineral lokal mampu menghasilkan aktivitas fotokatalitik yang tinggi, mendukung penguraian polutan organik seperti metilen biru dan pestisida secara efisien [3] [2][4]. Hal ini penting mengingat kebutuhan mendesak Indonesia untuk mengatasi masalah pencemaran lingkungan dan menyediakan teknologi yang lebih bersih dan efektif.

Lebih jauh lagi, pengembangan nanofluid dengan tambahan multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) dan polyethylene glycol (PEG) telah menunjukkan peningkatan signifikan dalam konduktivitas termal, yang berdampak positif pada aplikasi perlakuan material seperti quenching baja, memberikan hasil kekerasan yang lebih baik dan efisiensi proses yang meningkat [7]. Inovasi-inovasi ini mencerminkan sinergi antara pemanfaatan bahan lokal dan teknologi nano modern yang mendukung pengembangan teknologi berkelanjutan di Indonesia.

Namun, terdapat berbagai tantangan yang harus dihadapi, termasuk optimalisasi metode sintesis untuk mendapatkan nanomaterial dengan sifat fisik dan kimia yang tepat, serta keterbatasan infrastruktur dan pendanaan riset [4], [8]. Selain itu, kolaborasi antara akademisi, industri, dan pemerintah perlu diperkuat untuk mendorong komersialisasi hasil riset dan menjangkau pasar internasional [9], [10].

BAHAN DAN METODE

Bahan yang Digunakan

Dalam penelitian ini, bahan baku utama berasal dari sumber daya alam lokal Indonesia, yang meliputi limbah biomassa seperti ampas tebu dan cangkang kelapa sawit, serta mineral ilmenit sebagai bahan dasar sintesis nanomaterial TiO_2 . Limbah biomassa tersebut dipilih karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang ramah lingkungan, sejalan dengan pemanfaatan limbah pertanian yang dilaporkan pada jurnal [3], [5]. Sumber bahan lain adalah cangkang kepiting yang digunakan untuk menghasilkan hidroksiapatit dalam bentuk slow-release fertilizer [6]. Selain itu, bahan kimia pendukung seperti CTAB (cetyltrimethylammonium bromide) dan senyawa logam oksida seperti ZnO juga digunakan dalam modifikasi adsorben dan nanomaterial [3], [8].

Penggunaan bahan tambahan seperti multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) dan polyethylene glycol (PEG) untuk nanofluid juga diaplikasikan dalam perlakuan quenching baja, sebagaimana dijelaskan pada jurnal [7]. Dalam konteks fotokatalitik, nanopartikel TiO_2 dan ZnO disintesis untuk aplikasi degradasi polutan, mengikuti metode yang dikembangkan di jurnal [2], [4].

1. Metode Sintesis

Sintesis nanomaterial dilakukan melalui berbagai metode yang relevan dan hemat energi, antara lain metode sol-gel, hidrotermal, dan kimia hijau. Sintesis TiO_2 dari ilmenit menggunakan metode sol-gel telah dioptimalkan oleh Maulana et al [4], sedangkan ZnO disintesis dengan teknik sol-gel dan dikalasi pada suhu berbeda untuk memperoleh kristal dengan aktivitas fotokatalitik optimal [11]. Selain itu, nanopartikel berbasis karbon dari biomassa dihasilkan melalui proses pirolisis terkontrol dengan suhu yang diatur untuk menghasilkan biochar dengan porositas dan ukuran partikel nano [3], [5].

Proses penggabungan MWCNT dan PEG ke dalam nanofluid dilakukan dengan metode pencampuran homogen, seperti yang diaplikasikan pada jurnal [7], untuk meningkatkan konduktivitas termal dan efisiensi quenching pada baja. Nanomaterial TiO_2 juga dikombinasikan dengan metakaolin melalui metode sol-gel untuk menghasilkan komposit dengan sifat optik yang baik [12].

2. Metode Karakterisasi

Karakterisasi fisik dan kimia nanomaterial dilakukan dengan alat-alat canggih untuk memastikan ukuran partikel, struktur kristal, morfologi, dan sifat fotokatalitik. Teknik mikroskopi elektron scanning (SEM) dan transmisi (TEM) digunakan untuk mengamati morfologi nanomaterial biomassa dan mineral [2], [5], [6]. Difraksi sinar-X (XRD) digunakan untuk menentukan struktur kristal anatase TiO_2 serta stabilitasnya [2], [4], [8]. Spektroskopi UV-Vis dipakai untuk mengukur aktivitas fotokatalitik dalam degradasi metilen biru [11], [13].

Pengujian tambahan seperti analisis kekerasan material pada baja hasil quenching dengan nanofluid dilakukan sesuai metode [7], dan pengujian kapasitas adsorpsi logam berat pada biochar sesuai dengan metode [1].

3. Metode Pengujian Aplikasi

Uji aplikasi dilakukan pada tiga aspek utama, yaitu pemurnian air, teknologi energi terbarukan, dan pengolahan limbah industri. Untuk pemurnian air, efisiensi degradasi metilen biru dan senyawa organik diuji dengan paparan sinar UV, sebagaimana dilakukan pada jurnal [2], [3], [4]. Pengujian kapasitas adsorpsi logam berat menggunakan biochar mengikuti protokol dari jurnal [1], [5].

Pada sisi energi, pengujian nanokomposit $\text{NiO-TiO}_2\text{-CuO}$ sebagai anoda baterai lithium-ion dilakukan berdasarkan metode Edihar et al [14]. Untuk aplikasi nanofluid pada quenching baja, pengujian konduktivitas termal dan kekerasan baja setelah perlakuan sesuai dengan jurnal [7].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sintesis Nanomaterial Berbasis Sumber Daya Lokal Indonesia

Berbagai penelitian terbaru berhasil mengembangkan nanomaterial berbasis biomassa dan mineral lokal Indonesia, yang berpotensi besar untuk aplikasi teknologi berkelanjutan. Limbah biomassa seperti ampas tebu dan cangkang kelapa sawit disintesis menjadi biochar dan karbon nanostruktur berukuran 10-25 nm dengan morfologi berpori [3], [5], [6]. Limbah ini menyediakan alternatif bahan baku murah dan ramah lingkungan, sangat efektif untuk adsorpsi logam berat dan senyawa organik.

Di sisi lain, sintesis TiO_2 dari ilmenit lokal menghasilkan nanopartikel anatase berukuran 15-25 nm dengan struktur kristal stabil yang mendukung aktivitas fotokatalitik tinggi [2], [4], [12]. ZnO nanomaterial yang dihasilkan melalui metode sol-gel juga menunjukkan performa unggul dalam degradasi polutan organik dan logam berat [8]. Penambahan MWCNT pada nanofluid meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan, seperti yang dilaporkan di jurnal [7], memberikan manfaat dalam aplikasi perlakuan termal material. Di luar aplikasi lingkungan dan energi, penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa nanopartikel emas memiliki potensi tinggi dalam bidang medis, seperti biosensor untuk deteksi antigen, berkat sensitivitas plasmoniknya yang tinggi [15].

Tabel 1 Karakteristik Nanomaterial

Metode Karakterisasi	Temuan Utama	Jenis Nanomaterial	Referensi
SEM/TEM	Morfologi berpori, ukuran homogen	Biochar dari biomassa	[2], [5], [6]
XRD	Dominasi fase anatase	TiO_2	[2], [4], [8]
Spektroskopi UV-Vis, FTIR	Perubahan spektral dan struktur aerogel silika	Aerogel silika	[6], [12], [16]

SEM-XRD	Struktur stabil dan evolusi mikrostruktur	Polysilazane, SiC	[17]
---------	---	-------------------	------

Tabel 2 Kinerja dan Aplikasi Nanomaterial

Jenis Nanomaterial	Aplikasi Utama	Efisiensi/Kinerja	Referensi
Biochar dari limbah biomassa	Adsorpsi logam berat, degradasi pestisida	>90% penghilangan logam berat	[3]
TiO ₂ anatase	Fotokatalisis metilen biru	85–90% dalam 1–2 jam	[2], [4]
ZnO	Pengolahan limbah logam berat dan fenol	>90% efisiensi	[3], [8]
Nanofluid MWCNT+PEG	Perlakuan termal baja	Konduktivitas termal 0,68 W/mK; 43→48 HRC	[7]
PAN/TiO ₂ /Ag nanofiber	Filtrasi udara, fotokatalisis polutan udara	Efektif dalam dekomposisi	[2], [13]
NiO–TiO ₂ –CuO+ graphene	Anoda lithium-ion	Stabilitas dan kapasitas tinggi	[14]
Nanopartikel emas	Diagnostik medis (biosensor & imaging)	Sensitivitas tinggi (resonansi plasmon)	[15]

Tabel 3 Tantangan dan Peluang Pengembangan Nanomaterial di Indonesia

Aspek	Tantangan	Peluang	Referensi
Infrastruktur riset	Keterbatasan alat dan dana	Kolaborasi lintas sektor (akademisi-industri-pemerintah)	[9], [10]
Bahan baku	Belum optimal pemanfaatan biomassa/mineral lokal	Sumber daya lokal sangat melimpah dan murah	[3], [5]
Metode sintesis	Efisiensi dan kontrol struktur masih rendah	Optimalisasi metode: sol-gel, hidrotermal, pyrolysis	[4], [11]
Aplikasi	Fokus yang masih terbatas pada lingkungan	Ekspansi ke bidang medis, energi, dan material maju	[2], [14], [15], [17]

KESIMPULAN

Nanomaterial berbasis sumber daya lokal Indonesia, seperti TiO_2 , ZnO , biochar dari limbah biomassa, dan nanofluid berbasis MWCNT, memiliki potensi besar dalam mendukung teknologi berkelanjutan. Sintesis nanomaterial ini menawarkan solusi efisien dan ramah lingkungan untuk pemurnian air, pengolahan limbah, dan peningkatan teknologi energi terbarukan, sambil memanfaatkan bahan baku lokal yang melimpah, sehingga menurunkan biaya produksi dan dampak lingkungan. Karakteristik nanomaterial yang dihasilkan, seperti ukuran partikel nano, struktur kristal anatase TiO_2 , dan morfologi berpori biochar, mendukung efektivitas aplikasi fotokatalitik, adsorpsi, serta peningkatan sifat mekanik dalam perlakuan material. Berbagai metode sintesis yang diterapkan, seperti sol-gel, hidrotermal, dan pirolisis, telah terbukti mampu menghasilkan nanomaterial berkualitas tinggi dengan performa optimal. Namun, pengembangan nanomaterial di Indonesia masih menghadapi tantangan, antara lain keterbatasan infrastruktur riset, pendanaan, serta perlunya kolaborasi yang lebih erat antara akademisi, industri, dan pemerintah. Peluang pasar nasional maupun internasional yang besar membuka ruang inovasi dan pengembangan lebih lanjut, khususnya dengan penerapan prinsip kimia hijau dan pemanfaatan bahan baku alternatif. Dengan terus mengatasi kendala teknis dan ekonomis, serta meningkatkan efisiensi produksi dan stabilitas material, nanomaterial berbasis sumber daya lokal Indonesia dapat menjadi tulang punggung pengembangan teknologi berkelanjutan di masa depan, tidak hanya untuk Indonesia, tetapi juga sebagai contoh bagi negara berkembang lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Ansari, G. Azzahra, F. G. Nugroho, M. M. Mujtaba, and A. T. A. Ahmed, "Oxides and Metal Oxide/Carbon Hybrid Materials for Efficient Photocatalytic Organic Pollutant Removal," Feb. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/catal15020134.
- [2] S. Hartati *et al.*, "Synthesis of Electrospun PAN/TiO₂/Ag Nanofibers Membrane As Potential Air Filtration Media with Photocatalytic Activity," *ACS Omega*, vol. 7, no. 12, pp. 10516–10525, Mar. 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c00015.
- [3] R. Subagyo *et al.*, "Modification of Sugar Cane Bagasse with CTAB and ZnO for Methyl Orange and Methylene Blue Removal," *ACS Omega*, vol. 9, no. 23, pp. 25251–25264, Jun. 2024, doi: 10.1021/acsomega.4c02938.
- [4] F. A. Maulana *et al.*, "A review on novel routes of synthesizing titanium dioxide-based nanostructure derived from ilmenite mineral," Nov. 15, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.cesja.2024.100640.
- [5] F. G. Nugroho *et al.*, "Utilizing Indonesian Empty Palm Fruit Bunches: Biochar Synthesis via Temperatures Dependent Pyrolysis," *Nanomaterials*, vol. 15, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/nano15010050.
- [6] Y. Wibisono, S. R. Ummah, M. B. Hermanto, G. Djoyowasito, and A. Noviyanto, "Slow-release hydroxyapatite fertilizer from crab shells waste for sustainable crop production," *Results in Engineering*, vol. 21, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.101781.
- [7] W. N. Putra, M. Ariati, B. Suharno, A. Noviyanto, and I. M. Riko, "Effect of Multi-walled Carbon Nanotube and Polyethylene Glycol Addition in Nanofluid Quench Medium for Steel Heat Treatment Application," *International Journal of Technology*, vol. 15, no. 2, pp. 364–372, 2024, doi: 10.14716/ijtech.v15i2.6690.
- [8] S. Setiadji and V. Aprilia, "Effect of Calcination Temperature and Heating Rate on Zinc Oxide (ZnO) Synthesis Toward Antibacterial Properties," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 28, no. 2, pp. 82–87, Feb. 2025, doi: 10.14710/jksa.28.2.82-87.
- [9] F. Rismayanti, S. Ningrum, and I. Widianingsih, "Bibliometric Analysis Atas Artikel Terindeks Scopus Terkait Penggunaan Nanotechnology dan Nano Fertilizer," *Journal of Research and Technology*, vol. 9, no. Desember, pp. 119–131, 2023.
- [10] O. Zuas, S. S. Yudha, U. K. Yaumidin, S. D. Yuwono, A. B. Aritonang, and K. Kunci, "Analisis Bibliometrik Penelitian Bio-Sintesis Nanopartikel Perak (NP-Ag) di Indonesia," *Jurnal Riset Fisika Indonesia*, vol. 1, no. 1, 2020, [Online]. Available: <http://journal.ubb.ac.id/index.php/jrfi/index/2380>
- [11] E. Nurhidayah *et al.*, "Optimizing the photocatalytic performance of SnO₂ nanoparticles for methylene blue removal with variation in calcination temperatures," in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Feb. 2024. doi: 10.1051/e3sconf/202448802016.
- [12] B. Sitorus, F. Silaban, and A. B. Aritonang, "Optical Properties Characterization of TiO₂-Metakaolin Composites Synthesized by the Sol-Gel Method," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 28, no. 2, pp. 62–67, Feb. 2025, doi: 10.14710/jksa.28.2.62-67.
- [13] Y. A. Rezeki *et al.*, "Fabrication of Nanofiber Membranes from Waste-Expanded Polystyrene (EPS) Combined with Zinc Oxide Nanoparticles (ZnO NPs) and its Photocatalytic Activity," *Trends in Sciences*, vol. 21, no. 11, Nov. 2024, doi: 10.48048/tis.2024.8329.
- [14] M. Edihar, K. Kaharuddin, M. Nurdin, M. Maulidiyah, T. Azis, and M. Z. Diah, "Performance Study of NiO-TiO₂-CuO Nanocomposite Supported by Reduced Graphene Oxide as an Anode Candidate for Lithium-Ion Battery Development," *Jurnal Kimia Sains dan Aplikasi*, vol. 28, no. 2, pp. 73–81, Feb. 2025, doi: 10.14710/jksa.28.2.73-81.
- [15] A. Sulfianti *et al.*, "Antibody-labelled gold nanoparticles synthesized by laser ablation to detect SARS-CoV-2 antigen spike," *ADMET DMPK*, vol. 12, no. 1, pp. 193–208, 2024, doi: 10.5599/admet.2079.

- [16] I. F. Al-Sharuee and O. A. Hussein, "Spectral and Molecular Modifications of Hydrophilic Silica Aerogel: A Study on Doping Effects and Structural Evolution," *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology (ASSET)*, vol. 7, no. 2, 2025, doi: 10.26877/asset.v7i2.1553.
- [17] F. Fauzi *et al.*, "Silicon Carbide/Polysilazane Composite: Effect of Temperature on the Densification, Phase, and Microstructure Evolution," *Indonesian Journal of Chemistry*, vol. 22, no. 2, pp. 548–556, Apr. 2022, doi: 10.22146/ijc.69118.