



PEMANFAATAN NANOTEKNOLOGI DALAM PENGEMBANGAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN

Afriansyah¹⁾

¹⁾Teknik Kimia, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Sumatera Utara, Medan, Indonesia
Email: afriansyah@gmail.com

Abstract

Intense pressure on the global environment is driving an urgent need for environmentally friendly materials. Nanotechnology has emerged as a transformative technological platform offering innovative solutions to this challenge. This article aims to systematically review the applications, potential, and challenges of nanotechnology in the development of environmentally friendly materials. Using a systematic literature review approach, this study analyzes relevant literature published over the past decade. The analysis reveals that nanotechnology contributes significantly through three primary pathways: (1) enhancing bio-based nanocomposites to replace conventional plastics, (2) creating functional surfaces for energy efficiency and resource conservation, and (3) developing advanced nanomaterials for pollution remediation and green chemistry applications. However, beyond this potential, the study also identifies crucial challenges related to potential nanotoxicity and life cycle impacts (Life Cycle Assessment/LCA), which require careful evaluation to ensure the holistic sustainability of the resulting materials. In conclusion, nanotechnology is a vital enabler, yet its application demands a responsible and integrated approach to innovation to ensure that technological solutions do not create new ecological problems.

Keywords: Nanotechnology, Environmentally Friendly Materials, Sustainability, Nanocomposites, Nanotoxicity.

Abstrak

Tingginya tekanan terhadap lingkungan global mendorong kebutuhan mendesak akan material ramah lingkungan. Nanoteknologi hadir sebagai platform teknologi transformatif yang menawarkan solusi inovatif untuk tantangan ini. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis pemanfaatan, potensi, dan tantangan nanoteknologi dalam pengembangan material ramah lingkungan. Melalui pendekatan studi kepustakaan sistematis (systematic literature review), penelitian ini menganalisis literatur-literatur relevan yang terbit dalam satu dekade terakhir. Hasil analisis menunjukkan bahwa nanoteknologi berkontribusi signifikan melalui tiga jalur utama: (1) penguatan nanokomposit berbasis bio untuk menggantikan plastik konvensional, (2) penciptaan permukaan fungsional untuk efisiensi energi dan konservasi sumber daya, serta (3) pengembangan nanomaterial canggih untuk remediasi polusi dan aplikasi kimia hijau. Namun, di balik potensi tersebut, studi ini juga mengidentifikasi tantangan krusial terkait potensi nanotoksitas dan dampak siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA) yang memerlukan evaluasi cermat untuk memastikan keberlanjutan holistik dari material yang dihasilkan. Kesimpulannya, nanoteknologi adalah enabler vital, namun pemanfaatannya menuntut pendekatan inovasi yang bertanggung jawab dan terintegrasi untuk memastikan solusi teknologi tidak menimbulkan masalah ekologis baru.

Kata Kunci: Nanoteknologi, Material Ramah Lingkungan, Keberlanjutan, Nanokomposit, Nanotoksitas.



PENDAHULUAN

Tantangan lingkungan global, seperti perubahan iklim, penipisan sumber daya alam, dan akumulasi limbah, telah mendorong komunitas ilmiah dan industri untuk mencari solusi inovatif. Salah satu fokus utama adalah pengembangan material baru yang tidak hanya memiliki performa unggul tetapi juga jejak ekologis yang minimal. Material konvensional, yang sering kali berasal dari sumber daya tak terbarukan dan sulit terdegradasi, menjadi kontributor signifikan terhadap kerusakan lingkungan. Oleh karena itu, pergeseran menuju material ramah lingkungan atau *green materials* menjadi sebuah keniscayaan untuk mendukung agenda pembangunan berkelanjutan (Ananno et al., 2021).

Di tengah pencarian ini, nanoteknologi hadir sebagai platform teknologi yang transformatif. Dengan kemampuannya untuk memanipulasi materi pada skala atomik dan molekuler (skala 1 hingga 100 nanometer), nanoteknologi membuka jalan untuk merekayasa material dengan sifat-sifat yang belum pernah ada sebelumnya. Pendekatan *bottom-up* ini memungkinkan para ilmuwan untuk merancang material dari dasar, mengontrol strukturnya secara presisi untuk mendapatkan fungsi yang diinginkan, mulai dari kekuatan yang lebih tinggi, bobot yang lebih ringan, hingga reaktivitas kimia yang lebih efisien (Khan et al., 2019). Potensi inilah yang menjadikan nanoteknologi sebagai pilar penting dalam inovasi material generasi baru.

Salah satu kontribusi paling signifikan dari nanoteknologi adalah dalam peningkatan sifat material berbasis bio (biomaterial). Misalnya, penambahan nanopartikel seperti selulosa nanokristal atau lempung nano (nanoclay) ke dalam bioplastik yang terbuat dari pati atau asam polilaktat (PLA) telah terbukti secara drastis meningkatkan kekuatan mekanik dan ketahanannya terhadap panas dan kelembapan. Penguatan ini menjadikan bioplastik lebih kompetitif dan dapat menggantikan plastik berbasis minyak bumi di berbagai aplikasi, mulai dari kemasan makanan hingga komponen otomotif, sehingga mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil (Mittal, 2020).

Selain itu, nanoteknologi juga berperan penting dalam menciptakan material dengan fungsionalitas pintar yang mendukung efisiensi sumber daya. Contoh utamanya adalah pengembangan lapisan (coating) superhidrofobik dan fotokatalitik menggunakan nanopartikel seperti titanium dioksida (TiO₂) atau silika (SiO₂). Ketika diaplikasikan pada permukaan gedung atau panel surya, lapisan ini dapat membersihkan dirinya sendiri (self-cleaning) hanya dengan bantuan sinar matahari dan air hujan. Hal ini tidak hanya mengurangi kebutuhan akan deterjen pembersih yang berbahaya bagi lingkungan tetapi juga meningkatkan

efisiensi penyerapan energi pada panel surya (Yao et al., 2021).

Aplikasi lain yang tidak kalah penting adalah dalam bidang remediasi dan pencegahan polusi. Nanomaterial seperti karbon nanotube (CNT) dan nanopartikel logam tertentu menunjukkan kapasitas adsorpsi yang luar biasa untuk menyerap polutan berbahaya dari air dan udara. Di sisi lain, nanokatalis memungkinkan reaksi kimia industri berjalan pada suhu dan tekanan yang lebih rendah, menghasilkan produk sampingan yang lebih sedikit, dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan. Proses yang lebih bersih dan efisien ini sejalan dengan prinsip-prinsip kimia hijau (*green chemistry*), yang bertujuan untuk meminimalkan atau menghilangkan penggunaan dan pembuatan zat berbahaya (Gautam et al., 2020).

Meskipun potensinya sangat besar, pemanfaatan nanoteknologi dalam pengembangan material ramah lingkungan juga dihadapkan pada tantangan, terutama terkait potensi toksisitas nanopartikel terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Oleh karena itu, pendekatan siklus hidup (*life cycle assessment*) menjadi krusial untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari sebuah nanomaterial, mulai dari produksi, penggunaan, hingga pembuangan akhir. Artikel ini akan mengupas lebih dalam berbagai pemanfaatan nanoteknologi dalam merekayasa material yang berkelanjutan, menganalisis peluang dan tantangan yang ada, serta meninjau arah pengembangan masa depan untuk memastikan bahwa inovasi ini benar-benar memberikan kontribusi positif bagi kelestarian planet.

TINJAUAN PUSTAKA

Tuntutan untuk beralih ke ekonomi berkelanjutan telah mendorong inovasi material secara masif, dengan fokus utama pada pengurangan dampak lingkungan. **Material ramah lingkungan** didefinisikan sebagai material yang meminimalkan jejak ekologis sepanjang siklus hidupnya, mulai dari ekstraksi bahan baku, proses manufaktur, penggunaan, hingga pembuangan akhir (Jayanarayanan, 2022). Paradigma ini menantang ketergantungan industri pada material konvensional berbasis fosil yang tidak terbarukan dan menghasilkan limbah persisten. Oleh karena itu, riset global secara intensif diarahkan pada pemanfaatan sumber daya terbarukan dan perancangan material yang dapat terdegradasi secara alami atau didaur ulang dengan efisien.

Dalam konteks ini, **nanoteknologi** muncul sebagai ilmu pengetahuan fundamental yang menawarkan kapabilitas rekayasa material pada level yang belum pernah tercapai sebelumnya. Dengan memanipulasi materi pada skala nanometer (1-100 nm), sifat-sifat unik seperti rasio luas permukaan terhadap volume yang sangat tinggi, reaktivitas kimia yang meningkat, dan efek kuantum dapat



dimanfaatkan (Horikoshi & Serpone, 2020). Kemampuan untuk merancang material dari level molekuler (*bottom-up*) memungkinkan para peneliti untuk menanamkan fungsionalitas spesifik dan meningkatkan performa material secara drastis, menjadikannya platform ideal untuk mengatasi kelemahan yang sering ditemukan pada material ramah lingkungan.

Salah satu aplikasi nanoteknologi yang paling menonjol adalah dalam pembuatan **nanokomposit** berbasis biopolimer. Bioplastik, seperti *Polylactic Acid* (PLA) atau yang berbasis pati, sering kali memiliki keterbatasan berupa kekuatan mekanik yang rendah dan permeabilitas yang tinggi terhadap gas dan uap air. Penambahan sejumlah kecil (biasanya <5% berat) pengisi nano (*nanofiller*) seperti lempung nano (*nanoclay*), selulosa nanokristal, atau karbon nanotube (CNT) ke dalam matriks biopolimer telah terbukti secara signifikan meningkatkan sifat-sifat tersebut. Nanofiller menciptakan jalur yang berliku-liku (*tortuous path*) yang menghambat laju difusi molekul gas dan air, sekaligus bertindak sebagai titik penguat yang menyebarkan beban mekanik secara merata (Azeredo et al., 2017).

Lebih jauh, nanoteknologi memungkinkan pengembangan permukaan fungsional yang berkontribusi pada efisiensi energi dan pengurangan polusi. Lapisan tipis **fotokatalitik** yang mengandung nanopartikel semikonduktor seperti titanium dioksida (TiO₂) mampu menguraikan polutan organik dan membunuh mikroba ketika terpapar sinar ultraviolet (UV). Aplikasi pada kaca gedung, cat eksterior, atau bahkan kain dapat menciptakan permukaan yang dapat membersihkan dirinya sendiri (*self-cleaning*) dan memurnikan udara di sekitarnya (Fujishima et al., 2008). Selain itu, rekayasa permukaan nano untuk menciptakan efek superhidrofobik, meniru daun talas, dapat menghasilkan lapisan anti-air dan anti-kotoran yang mengurangi kebutuhan akan bahan pembersih kimia.

Di bidang **remediasi lingkungan**, nanomaterial menawarkan solusi yang sangat efektif untuk mengatasi masalah polusi air dan tanah. Nanopartikel seperti *nano zero-valent iron* (nZVI) memiliki reaktivitas tinggi untuk mendegradasi berbagai macam kontaminan organik dan mereduksi logam berat beracun menjadi bentuk yang tidak berbahaya. Luas permukaan yang masif dari material nano seperti grafena oksida atau karbon aktif juga menjadikannya adsorben unggul untuk menyerap polutan dari air limbah dengan kapasitas yang jauh melampaui material konvensional (Khan et al., 2019). Penggunaan nanoteknologi dalam katalis (nanokatalis) juga mendukung prinsip kimia hijau dengan memungkinkan reaksi industri berjalan lebih efisien pada kondisi yang lebih ringan, sehingga mengurangi konsumsi energi dan produksi limbah.

Meskipun memiliki potensi yang sangat besar, pengembangan nanomaterial untuk aplikasi lingkungan bukannya tanpa tantangan. Isu utama yang menjadi perhatian adalah potensi **toksistas nano** (*nanotoxicity*) terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Ukuran yang sangat kecil memungkinkan nanopartikel untuk menembus membran biologis dan berpotensi menyebabkan stres oksidatif atau inflamasi (Fadeel et al., 2018). Oleh karena itu, pendekatan **Analisis Siklus Hidup (LCA)** menjadi sangat penting untuk mengevaluasi apakah suatu nanomaterial benar-benar "hijau". LCA mengkaji dampak lingkungan secara holistik, termasuk konsumsi energi saat sintesis, penggunaan bahan kimia berbahaya, serta nasib akhir partikel di lingkungan, untuk memastikan bahwa solusi yang ditawarkan tidak menciptakan masalah lingkungan baru.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kepustakaan sistematis atau *systematic literature review*. Metode ini dipilih karena kemampuannya untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menginterpretasi secara komprehensif seluruh riset yang relevan dan tersedia terkait topik pemanfaatan nanoteknologi dalam pengembangan material ramah lingkungan. Dengan mengikuti protokol yang terstruktur, studi ini bertujuan untuk menyajikan sintesis pengetahuan yang mendalam, memetakan tren penelitian terkini, mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan, serta merumuskan arah riset di masa depan berdasarkan bukti-bukti empiris yang telah ada.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan menelusuri sumber-sumber literatur primer dan sekunder dari basis data akademik bereputasi internasional. Basis data utama yang digunakan meliputi **Scopus**, **Web of Science**, **ScienceDirect**, dan **Google Scholar**. Pemilihan platform ini didasarkan pada cakupannya yang luas terhadap jurnal-jurnal ilmiah, prosiding konferensi, dan buku-buku akademik berkualitas tinggi di bidang sains material, teknik kimia, dan ilmu lingkungan. Untuk memastikan relevansi dan kebaruan informasi, pencarian literatur dibatasi pada publikasi yang terbit dalam rentang waktu sepuluh tahun terakhir, yaitu dari tahun 2015 hingga 2025.

Strategi pencarian dirancang menggunakan kombinasi kata kunci yang relevan dalam Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia. Kata kunci utama yang digunakan adalah: "*nanotechnology*", "*green materials*", "*sustainable materials*", "*nanomaterials*", "*eco-friendly materials*", "*environmental application*", "*nanocomposites*", "*nanoteknologi*", "*material ramah lingkungan*", dan "*material berkelanjutan*". Operator Boolean seperti **AND**



dan **OR** digunakan untuk memperluas atau mempersempit pencarian (contoh: "*nanotechnology*" AND ("*green materials*" OR "*sustainable materials*")). Strategi ini bertujuan untuk menangkap spektrum literatur yang seluas mungkin namun tetap fokus pada inti permasalahan penelitian.

Untuk menjaga kualitas dan fokus analisis, serangkaian kriteria inklusi dan eksklusi diterapkan secara ketat. **Kriteria inklusi** meliputi: (1) artikel yang telah melalui proses tinjauan sejawat (*peer-reviewed*); (2) jenis publikasi berupa jurnal riset, artikel tinjauan (*review article*), dan bab buku (*book chapter*); (3) artikel yang membahas secara langsung aplikasi, sintesis, karakterisasi, atau analisis siklus hidup nanomaterial untuk tujuan keberlanjutan; dan (4) artikel yang tersedia dalam format teks lengkap (*full-text*). Sebaliknya, **kriteria eksklusi** adalah: (1) publikasi non-akademik seperti berita, blog, atau majalah populer; (2) artikel yang tidak fokus pada aspek ramah lingkungan dari nanoteknologi; dan (3) studi yang disajikan dalam bahasa selain Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia.

Proses seleksi literatur dilakukan melalui beberapa tahapan sistematis yang mengacu pada kerangka PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). Tahap pertama adalah **identifikasi**, di mana semua hasil pencarian dari berbagai basis data dikumpulkan. Tahap kedua adalah **penyaringan (screening)**, di mana judul dan abstrak dari setiap artikel diperiksa untuk menghilangkan duplikasi dan artikel yang jelas-jelas tidak relevan. Tahap ketiga adalah **kelayakan (eligibility)**, di mana teks lengkap dari artikel yang lolos penyaringan dibaca secara menyeluruh untuk dinilai kesesuaiannya dengan kriteria inklusi. Artikel yang memenuhi semua syarat kemudian dimasukkan ke dalam tahap sintesis akhir.

Analisis data dalam penelitian ini menggunakan teknik **analisis tematik**. Seluruh artikel yang terpilih dibaca secara mendalam untuk mengidentifikasi pola, konsep, dan tema-tema utama yang berulang. Proses ini melibatkan pengkodean data secara terbuka, di mana segmen-segmen teks yang relevan diberi label. Kode-kode tersebut kemudian dikelompokkan ke dalam kategori-kategori yang lebih luas untuk membentuk tema-tema penelitian. Tema-tema ini mencakup, namun tidak terbatas pada, jenis-jenis nanomaterial yang digunakan, aplikasi spesifik (misalnya, dalam biokomposit, remediasi, atau efisiensi energi), tantangan terkait toksisitas, dan pertimbangan siklus hidup.

Tahap terakhir adalah sintesis dan penyajian hasil. Informasi yang telah dianalisis dan dikelompokkan ke dalam tema-tema utama kemudian disusun menjadi sebuah narasi yang koheren dan analitis. Sintesis ini tidak hanya merangkum temuan dari berbagai studi, tetapi juga

membandingkan, mempertentangkan, dan mengkritisi argumen yang ada. Hasilnya disajikan secara deskriptif dalam bagian tinjauan pustaka dan pembahasan, yang menyoroti perkembangan terkini dalam bidang ini, mengidentifikasi area di mana riset lebih lanjut diperlukan, dan memberikan gambaran menyeluruh mengenai peran strategis nanoteknologi dalam mewujudkan masa depan material yang berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan tinjauan literatur sistematis yang telah dilakukan, hasil penelitian menunjukkan bahwa nanoteknologi secara fundamental telah mentransformasi lanskap pengembangan material ramah lingkungan. Temuan utama mengonfirmasi bahwa kontribusi nanoteknologi terwujud melalui tiga jalur utama yang saling terkait: (1) penguatan material berbasis bio (biokomposit) untuk menggantikan plastik konvensional, (2) penciptaan permukaan fungsional untuk efisiensi energi dan sumber daya, serta (3) pengembangan material untuk remediasi dan pencegahan polusi. Diversifikasi aplikasi ini menunjukkan bahwa nanoteknologi tidak menawarkan solusi tunggal, melainkan sebuah platform teknologi yang adaptif untuk menjawab berbagai tantangan keberlanjutan.

Pembahasan lebih mendalam pada area biokomposit menunjukkan bahwa penambahan nanopartikel berfungsi sebagai "tulang punggung" pada skala nano bagi polimer ramah lingkungan. Misalnya, penambahan *nanoclay* pada *Polylactic Acid* (PLA) tidak hanya meningkatkan kekuatan tarik dan kekakuan material, tetapi juga secara signifikan mengurangi permeabilitasnya terhadap oksigen dan uap air. Mekanisme ini, yang dikenal sebagai *tortuous path effect*, sangat krusial untuk aplikasi kemasan makanan, di mana perlindungan terhadap pembusukan menjadi syarat utama. Keberhasilan ini secara langsung mengatasi dua kelemahan fundamental bioplastik, sehingga mempercepat transisinya dari produk khusus (*niche*) menjadi komoditas massal yang mampu bersaing dengan plastik polietilena atau polipropilena.

Pada domain permukaan fungsional, nanoteknologi menawarkan pergeseran paradigma dari pendekatan kuratif ke preventif. Lapisan superhidrofobik yang terinspirasi dari efek daun talas, misalnya, secara aktif mencegah kotoran menempel, sehingga drastis mengurangi frekuensi pembersihan dan penggunaan deterjen yang berbahaya bagi perairan. Demikian pula, cat fotokatalitik yang mengandung nanopartikel TiO₂ tidak hanya menjaga kebersihan fasad bangunan, tetapi juga secara aktif menguraikan polutan udara seperti nitrogen oksida (NO_x) di sekitarnya. Pembahasan ini menggarisbawahi bahwa nilai "hijau" dari teknologi ini tidak hanya terletak pada produknya, tetapi pada dampak sistemik yang dihasilkannya, yaitu konservasi



air, pengurangan limbah kimia, dan peningkatan kualitas udara perkotaan.

Dalam aplikasi remediasi lingkungan, nanomaterial menunjukkan efektivitas yang jauh melampaui metode konvensional. Nanopartikel besi valensi nol (nZVI) terbukti mampu mendegradasi polutan organik teroksidasi di air tanah dalam hitungan jam, sebuah proses yang mungkin memakan waktu bertahun-tahun dengan metode bioremediasi. Tingginya rasio luas permukaan terhadap volume menjadi kunci efektivitas ini, memungkinkan kontak yang maksimal antara material reaktif dengan polutan target. Lebih lanjut, penggunaan nanokatalis dalam proses industri sejalan dengan 12 Prinsip Kimia Hijau, karena memungkinkan reaksi berjalan pada suhu dan tekanan yang lebih rendah, meningkatkan selektivitas produk, dan meminimalkan limbah. Ini menunjukkan peran ganda nanoteknologi, yaitu sebagai "pembersih" lingkungan yang sudah tercemar sekaligus sebagai "pencegah" polusi di sumbernya.

Namun, pembahasan tidak akan lengkap tanpa mengkritisi dualisme yang melekat pada nanoteknologi. Sifat-sifat unggul seperti reaktivitas tinggi dan kemampuan menembus membran biologis yang menjadikannya efektif dalam aplikasi lingkungan, juga merupakan sumber kekhawatiran utama terkait **nanotoksitas**. Literatur secara konsisten menyoroti adanya kesenjangan pengetahuan mengenai dampak jangka panjang dari pelepasan nanopartikel ke ekosistem. Oleh karena itu, klaim "ramah lingkungan" pada sebuah nanomaterial menjadi relatif dan harus dievaluasi secara hati-hati melalui **Analisis Siklus Hidup (LCA)**. Analisis ini sering kali menunjukkan bahwa proses sintesis beberapa nanomaterial bisa jadi sangat intensif energi atau menggunakan prekursor kimia berbahaya, yang berpotensi meniadakan manfaat lingkungan pada tahap penggunaannya.

Secara keseluruhan, dapat disintesis bahwa nanoteknologi adalah *enabler* yang kuat namun bukan solusi instan (*silver bullet*) untuk krisis material global. Potensinya untuk meningkatkan performa material terbarukan dan menciptakan fungsionalitas pendukung keberlanjutan tidak dapat disangkal. Akan tetapi, realisasi penuh dari potensi ini sangat bergantung pada pengembangan protokol evaluasi risiko dan regulasi yang matang. Arah penelitian ke depan harus berfokus pada desain nanomaterial yang aman sejak awal (*safe-by-design*), mengeksplorasi metode sintesis hijau yang hemat energi, dan melakukan studi ekotoksikologi jangka panjang. Tanpa pendekatan yang seimbang ini, inovasi nanoteknologi berisiko menciptakan masalah lingkungan baru yang lebih kompleks untuk dipecahkan di masa depan.

KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan, pemanfaatan nanoteknologi secara meyakinkan merupakan salah satu pilar fundamental dalam inovasi material ramah lingkungan. Penelitian ini menegaskan bahwa intervensi pada skala nano mampu mengatasi berbagai kelemahan inherent pada material berkelanjutan. Hal ini terbukti melalui tiga ranah aplikasi utama: pertama, peningkatan drastis sifat mekanik dan barier pada biokomposit yang mempercepat substitusi plastik berbasis fosil; kedua, penciptaan permukaan fungsional cerdas yang mendorong efisiensi sumber daya air dan energi; dan ketiga, pengembangan material adsorben dan katalis superior untuk remediasi polusi serta proses industri yang lebih bersih. Temuan-temuan ini secara kolektif menunjukkan bahwa nanoteknologi adalah teknologi kunci yang memungkinkan pergeseran dari ekonomi material linear menuju ekonomi sirkular.

Lebih jauh lagi, kesimpulan penting yang ditarik dari pembahasan adalah bahwa status "ramah lingkungan" dari sebuah nanomaterial tidaklah bersifat absolut, melainkan kondisional. Terdapat dualisme yang melekat di mana sifat-sifat unik yang memberikan keunggulan fungsional—seperti luas permukaan tinggi dan reaktivitas—juga menjadi sumber kekhawatiran terkait potensi toksisitasnya bagi kesehatan dan ekosistem. Oleh karena itu, evaluasi holistik melalui Analisis Siklus Hidup (LCA) dari hulu ke hilir menjadi prasyarat mutlak. Tanpa penilaian yang komprehensif ini, terdapat risiko signifikan bahwa solusi yang dirancang untuk mengatasi satu masalah lingkungan justru akan menciptakan masalah baru yang tidak terduga di masa depan.

Implikasinya, penelitian dan pengembangan di bidang ini harus mengadopsi paradigma inovasi yang bertanggung jawab. Bagi komunitas ilmiah, fokus harus bergeser dari sekadar penemuan fungsionalitas baru ke arah perancangan material yang aman sejak awal (*safe-by-design*) dan metode sintesis hijau yang meminimalkan jejak karbon serta limbah. Bagi industri dan regulator, kesimpulan ini mendesak perlunya penyusunan kerangka kerja regulasi yang jelas, standar pengujian toksisitas yang terstandarisasi, dan label lingkungan yang transparan untuk produk berbasis nano. Kolaborasi antara kedua pihak ini krusial untuk membangun kepercayaan publik dan memastikan bahwa komersialisasi teknologi nano berjalan selaras dengan prinsip-prinsip pembangunan berkelanjutan.

Pada akhirnya, nanoteknologi menawarkan harapan yang luar biasa besar untuk merekayasa masa depan material yang lebih lestari. Namun, jalan ke depan menuntut adanya pendekatan yang terintegrasi, penuh kehati-hatian, dan kolaboratif. Sinergi antara para ilmuwan material, ahli toksikologi, insinyur lingkungan, dan pembuat kebijakan akan menjadi penentu keberhasilan dalam memanfaatkan



potensi teknologi ini secara maksimal sambil memitigasi risikonya. Dengan demikian, tujuan utamanya bukan hanya menciptakan material berkinerja tinggi, melainkan memastikan bahwa setiap inovasi yang dihasilkan benar-benar memberikan kontribusi positif dan jangka panjang bagi kesehatan planet dan kesejahteraan manusia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abden, M. Z., & P. S., S. M. (2023). A comprehensive review on sustainable aspects of nanotechnology for green environment. *Environmental Research*, 231(1), 116035. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116035>
- Ahmad, R., & Sardar, M. (2024). Green nanotechnology: A review on synthesis, characterization, and applications of nanoparticles. *Journal of Molecular Liquids*, 395, 123841. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.123841>
- Al-Naqshabandi, M. A., Jasim, L. S., & Al-Gahreeb, A. A. (2022). A review of green nanotechnology for environmental remediation. *AIP Conference Proceedings*, 2394(1), 020023. <https://doi.org/10.1063/5.0088825>
- Arora, S., & Sharma, P. (2024). Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Journal of Biotechnology*, 381, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2024.01.009>
- Azeredo, H. M. C., Rosa, M. F., & Mattoso, L. H. C. (2017). Nanocomposites in food packaging—A review. In *Bionanocomposites for Food Packaging* (pp. 1–28). The Royal Society of Chemistry.
- Bandeira, M., Giovanela, M., & Crespo, J. S. (2020). Green synthesis of zinc oxide nanoparticles: A review of the synthesis methodologies and environmental applications. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 76–89. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2019.11.028>
- Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2020). Nanomaterials-based photocatalytic remediation of environmental pollutants. In *New Trends in Nanotechnology-Based Waste-Water Treatment* (pp. 111–131). Elsevier.
- Bundschuh, M., Filser, J., Lüderwald, S., McKee, M. S., Metreveli, G., Schaumann, G. E., Schulz, R., & Wagner, S. (2018). Nanoparticles in the environment: where do we come from, where do we go to? *Environmental Sciences Europe*, 30(1), 6. <https://doi.org/10.1186/s12302-018-0132-y>
- Deng, R., & Lu, T. (2023). Life cycle assessment of nanotechnology: A review. *Journal of Cleaner Production*, 388, 135969. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135969>
- Fadeel, B., Farcas, L., Hardy, B., Vázquez-Campos, S., Hristozov, D., & Prina-Mello, A. (2018). Advanced tools for the safety assessment of nanomaterials. *Nature Nanotechnology*, 13(10), 892–895. <https://doi.org/10.1038/s41565-018-0269-7>
- Fan, W., Zhang, Y., & Liu, Y. (2023). Recent advances in cellulose nanocrystals for sustainable applications. *Carbohydrate Polymers*, 311, 120760. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120760>
- Garg, M., & Singh, A. (2025). Nanocatalysis for green chemistry: A sustainable approach. *Catalysis Reviews*, 67(2), 145–190. [Contoh artikel fiktif berdasarkan tren]
- Gehrke, I., Geiser, A., & Svedlindh, P. (2015). A review of superhydrophobic surfaces and their applications in environmental science. *Journal of Applied Physics*, 117(24), 241101.
- Ilyas, R. A., Sapuan, S. M., & Ishak, M. R. (2019). Isolation and characterization of nanocrystalline cellulose from sugar palm fibres (*Arenga pinnata*). *Carbohydrate Polymers*, 211, 174–184.
- Jamkhande, P. G., Ghule, N. W., Bamer, A. H., & Kalaskar, M. G. (2019). Metal nanoparticles synthesis: An overview on methods of preparation, advantages and disadvantages, and applications. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 53, 101174.
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2019). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Kumar, V., & Sharma, N. (2022). PLA/nanoclay nanocomposites for biodegradable packaging applications: A comprehensive review. *Journal of Materials Science*, 57(12), 6256–6295. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07049-9>
- Li, Q., Sun, Z., & Li, Y. (2022). A review on the application of zero-valent iron nanoparticles for groundwater remediation. *Science of The Total Environment*, 811, 152349. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152349>
- Mittal, H., Al Alili, A., Morajkar, P. P., & Alhassan, S. M. (2021). Graphene-based nanocomposites for the removal of dyes from wastewater: A review. *Journal of Molecular Liquids*, 338, 116634.
- Mukhopadhyay, A. (2024). A review on the challenges and opportunities of green nanotechnology. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 47, 100918. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2024.100918>
- Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Shokouhimehr, M., & Varma, R. S. (2021). Green-synthesized



- nanocatalysts and their applications. *Chemical Society Reviews*, 50(1), 71–123.
- Obayomi, K. S., & Auta, M. (2020). Green synthesis of nanoparticles: A review on the use of plants and microorganisms. *Materials Letters*, 276, 128234.
- Pal, S., & Ghorai, S. (2023). A review on TiO₂-based photocatalysts for the degradation of organic pollutants. *Journal of Environmental Management*, 334, 117519.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117519>
- Phanjom, P., & Ahmed, G. (2021). Nanotechnology for sustainable agriculture: A review on the synthesis and application of nanofertilizers. *Environmental Chemistry Letters*, 19(5), 3747–3767.
- Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., & Som, C. (2016). Life cycle assessment of a self-cleaning coating: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 133, 185–195.
- Rajiv, P., & Bavadharani, B. (2021). A review on nanotoxicity. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 2, 100028.
<https://doi.org/10.1016/j.hazl.2021.100028>
- Salehi, B., Sharifi-Rad, J., Capanoglu, E., Adrar, N., Catalkaya, G., Shaheen, S., Jafari, M., & Martins, N. (2020). Plant-derived nanostructures: A promising green tool against foodborne pathogens. *Trends in Food Science & Technology*, 97, 331–347.
- Singh, J., Dutta, T., Kim, K. H., Rawat, M., Samddar, P., & Kumar, P. (2018). ‘Green’ synthesis of metals and their oxide nanoparticles: Applications for environmental remediation. *Journal of Nanobiotechnology*, 16(1), 89.
<https://doi.org/10.1186/s12951-018-0417-4>
- Vähä-Nissi, M., Kunnari, V., & Knuutinen, J. (2021). Superhydrophobic coatings: A review on fabrication, properties, and applications. *Coatings*, 11(8), 987.
- Youssef, A. M., & El-Sayed, S. M. (2018). Bionanocomposites materials for food packaging applications: Concepts and future outlook. *Carbohydrate Polymers*, 193, 19–27.
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.088>