Journal BIOnatural
Volume 12, Number 1, 2025 pp. 33-47
P-ISSN 2355-3790 E-ISSN: 2579-4655
Open Access: https://ejournal.uncm.ac.id/index.php/bio

NANOTEKNOLOGI UNTUK KEBERLANJUTAN

Abd Mujahid Hamdan[1], Yunasar[2], Muttaqin[3], Sri Indah Setiyaningsih[4] Irzi fahilal [5]
[12] Teknik Fisika, Fakultas Sains Dan Teknologi, UIN Ar-Raniry Banda Aceh
[3] Uiversitas Cipta Mandiri
[4]Universitas Gunadarma
* Corresponding Author: Pohanmyasir@gmail.com

Abstrak
Nanoteknologi hijau menawarkan solusi inovatif untuk menjembatani teknologi nano dan keberlanjutan, mendukung tercapainya SDGs sekaligus mengatasi tantangan global. Ulasan ini mengupas berbagai aspek penting, mulai dari prinsip dasar hingga penerapan Nanoteknologi Hijau (GNT) dalam energi bersih, pengurangan polusi, pengolahan air, dan pertanian ramah lingkungan. Tantangan terkait regulasi, etika, keselamatan, serta keterbatasan teknologi juga menjadi perhatian utama. Ke depan, diperlukan sinergi lintas bidang dan kebijakan yang mendukung pemanfaatan nanoteknologi berkelanjutan untuk mempercepat pencapaian SDGs. Kami berharap ulasan ini dapat mendorong upaya penelitian dan kebijakan berbasis lingkungan yang lebih progresif dan bertanggung jawab.

Kata Kunci: *Nanoteknologi; keberkelanjutan*

Abstract
Nanotechnology provides innovative pathways to integrate nanotechnology with sustainability, aiding in the realization of the Sustainable Development Goals (SDGs) while tackling critical global issues. This review delves into fundamental principles and practical applications of nanotechnology, including advancements in clean energy, pollution mitigation, water purification, and sustainable agriculture. It also addresses key challenges such as regulatory hurdles, ethical considerations, safety concerns, and technological constraints. Looking ahead, fostering interdisciplinary collaboration and implementing supportive policies are vital to promoting the sustainable adoption of nanotechnology and expediting progress toward the SDGs. We aspire for this review to encourage forward-thinking, environmentally conscious research and policy initiatives that drive meaningful change.

Keywords: *Green nanotechnology · Sustainable development goals · Environmental remediation · Energy efciency · Water treatment · Sustainable agriculture*

PENDAHULUAN

Nanoteknologi Hijau (*Green Nanotechnology*/GNT) adalah pendekatan inovatif yang menggabungkan nanoteknologi dengan prinsip keberlanjutan untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan. Dengan menggunakan kimia hijau, sumber daya terbarukan, dan proses hemat energi, GNT memastikan nanomaterial dapat diproduksi dan digunakan secara lebih aman bagi manusia dan lingkungan (Nasrollahzadeh et al., 2019; Singh et al., 2023). Pendekatan ini menekankan penggunaan bahan non-toksik, biodegradable, pelarut ramah lingkungan, serta metode sintesis berkelanjutan yang meminimalkan limbah berbahaya dan konsumsi energi (Menegaldo et al., 2023). Penilaian siklus hidup (Life Cycle Assessment/LCA) digunakan untuk memastikan nanomaterial yang dihasilkan memiliki toksisitas rendah, dapat didaur ulang, dan berkontribusi pada pengurangan polusi (Ali & Ghareeb, 2023). Pendekatan ini mendukung konservasi lingkungan, pengurangan limbah, optimalisasi proses, dan peningkatan daur ulang (Tyagi et al., 2016).

GNT memiliki potensi luas di berbagai sektor untuk mengatasi tantangan global, seperti energi bersih, pertanian berkelanjutan, dan pengolahan air. Teknologi ini berperan penting dalam mendukung Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) PBB. Misalnya, di sektor pertanian, nanoteknologi meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk dan pestisida, selaras dengan SDG 2 (Tanpa Kelaparan). Dalam sektor energi, GNT memperbaiki teknologi penyimpanan dan konversi energi, mendukung SDG 7 (Energi Bersih dan Terjangkau). Sementara itu, inovasi nanoteknologi dalam pemurnian air membantu pencapaian SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi) (Aithal & Aithal, 2021; Dhahri & Omri, 2018).

Selain itu, GNT juga mendorong produksi yang bersih dan pengurangan limbah, mendukung SDG 12 (Konsumsi dan Produksi yang Bertanggung Jawab). Teknologi ini turut berkontribusi pada upaya aksi iklim (SDG 13), perlindungan ekosistem laut (SDG 14), dan pelestarian ekosistem darat (SDG 15). Untuk mencapai semua tujuan ini, diperlukan kolaborasi lintas sektor antara pemerintah, industri, dan masyarakat sipil, sesuai dengan SDG 17 (Kemitraan untuk Mencapai Tujuan) (Lu & Ozcan, 2015).

Dalam perkembangannya, GNT telah menjadi alat penting untuk menyeimbangkan pembangunan ekonomi dengan perlindungan lingkungan dan kesejahteraan sosial. Dengan fokus pada efisiensi sumber daya dan pengurangan polusi, GNT siap memainkan peran utama dalam mencapai SDGs sekaligus menciptakan masa depan yang lebih berkelanjutan dan berkeadilan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hubungan Nanoteknologi dan Keberlanjutan

Nanoteknologi Hijau (*Green Nanotechnology*/GNT) berkontribusi signifikan terhadap pencapaian *Tujuan Pembangunan Berkelanjutan* (*Sustainable Development Goals*/SDGs) dengan mengintegrasikan teknologi nano ke dalam solusi inovatif yang ramah lingkungan. Teknologi ini berfokus pada produksi nanomaterial dan perangkat nano yang meminimalkan dampak lingkungan, melindungi ekosistem, mengurangi polusi, serta melestarikan sumber daya alam (Pandit et al., 2023). Selain itu, GNT mempromosikan efisiensi dalam penggunaan energi, air, dan bahan baku sepanjang siklus hidup nanomaterial (Corsi et al., 2023).

GNT mendorong transformasi menuju *ekonomi sirkular* dengan mengurangi konsumsi sumber daya, meningkatkan efisiensi energi, dan meminimalkan limbah (Omran & Baek, 2022). Pendekatan ini mengintegrasikan prinsip *kimia hijau* dan *ekonomi sirkular* untuk mengurangi dampak lingkungan sambil memastikan kelayakan ekonomi (Ncube et al., 2023). Namun, implementasi masih menghadapi tantangan seperti investasi yang tinggi, kurangnya pendidikan lingkungan, dan kendala regulasi. Solusi jangka panjang mencakup penguatan kesepakatan internasional, insentif adopsi teknologi ramah lingkungan, serta regulasi untuk mendorong produksi dan konsumsi yang bertanggung jawab.

Nanoteknologi hijau juga mendukung keadilan sosial dengan memperluas akses ke teknologi ramah lingkungan, energi bersih, dan air bersih. Hal ini membantu mengurangi kemiskinan, meningkatkan layanan kesehatan, serta memperbaiki kualitas hidup, terutama di daerah yang kurang terlayani. Teknologi ini juga memainkan peran penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui pengembangan energi terbarukan dan sistem energi rendah karbon (Boullouz et al., 2022; Vellayappan et al., 2016).

Inovasi GNT di sektor pengelolaan air, seperti sistem filtrasi berbasis nanomaterial, adsorben, dan katalis, mampu membersihkan air dari polutan serta mendukung tujuan SDG 6 (Mathur et al., 2022; Mir et al., 2022). Di sektor pertanian, GNT meningkatkan efisiensi nutrisi, hasil panen, dan mengurangi penggunaan agrokimia. Teknologi ini mendukung *pertanian presisi*, metode ramah lingkungan, serta produksi pangan berkelanjutan, yang selaras dengan upaya menjaga ketahanan pangan dan pengelolaan lahan yang berkelanjutan (Rodrigues et al., 2017; Scott et al., 2018).

Life Cycle Assessment (LCA) adalah metode penting untuk mengevaluasi dampak lingkungan nanomaterial di setiap tahap siklus hidupnya, mulai dari produksi hingga pembuangan. Evaluasi ini mencakup penggunaan energi, bahan baku, dan efek lingkungan selama proses tersebut (Shastri et al., 2024;

Alves et al., 2023). Studi menunjukkan bahwa tahap produksi nanomaterial sering kali menjadi kontributor utama konsumsi energi kumulatif dan pemanasan global, terutama karena energi yang terkandung dalam bahan baku dan pelarut (Gaur, 2021).

Aplikasi LCA pada berbagai nanomaterial, seperti polipropilena, polietilena, dan polilaktat dengan nanopartikel (contohnya perak dan TiO2), menunjukkan manfaat seperti peningkatan umur simpan produk, pengurangan berat material, dan efisiensi energi (Ros-Lis & Benitez, 2024). Selain itu, bionanokomposit, perpaduan polimer alami dan nanopartikel, menawarkan solusi ramah lingkungan untuk berbagai sektor, termasuk pemurnian air dan pengobatan regeneratif (Riaz et al., 2024).

LCA membantu mengidentifikasi tahap-tahap dengan konsumsi energi tinggi dalam proses nanoteknologi, memungkinkan pengembangan strategi mitigasi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Sebagai contoh, LCA diterapkan dalam pengembangan *Single Chain Polymer Nanoparticles* (SCNPs) untuk mengevaluasi dampak lingkungan sebelum diterapkan dalam skala besar (Galant et al., 2023).

Dengan penerapan LCA, berbagai sektor dapat mengoptimalkan proses

produksi, mengurangi penggunaan bahan baku, dan menurunkan konsumsi energi. Sebagai alat prospektif, LCA memungkinkan evaluasi komprehensif terhadap berbagai skenario sehingga membantu pengambilan keputusan yang lebih bertanggung jawab (Quici et al., 2023; Saavedra & Osma, 2024).

Nanoteknologi hijau berpotensi besar mendukung SDGs dengan menawarkan solusi inovatif yang menggabungkan efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, dan perlindungan ekosistem. Dengan pendekatan berbasis LCA dan kolaborasi lintas sektor, GNT dapat mempercepat transisi menuju masa depan yang berkelanjutan dan tangguh. Untuk mendukung implementasi GNT secara luas, diperlukan dukungan berupa kebijakan, pendidikan, dan investasi yang berfokus pada keberlanjutan.

2. Prinsip LCA

Dalam konteks *Green Nanotechnology* (GNT) dan praktik ramah lingkungan, terdapat penekanan kuat pada evaluasi dampak lingkungan nanomaterial di setiap tahap siklus hidupnya. Penilaian ini mencakup penggunaan energi, bahan baku, serta dampak lingkungan selama proses produksi, penggunaan, hingga pembuangan, sebagai panduan utama (Shastri et al., 2024; Gaur, 2021; Alves et al., 2023).

Penelitian terkait *Life Cycle Assessment* (LCA) menunjukkan bahwa proses yang membutuhkan energi tinggi, seperti pembuatan bahan baku dan penggunaan energi dalam pelarut, secara signifikan meningkatkan konsumsi energi kumulatif serta berkontribusi terhadap pemanasan global (Gaur, 2021). Dengan mempertimbangkan berbagai aspek, LCA menjadi sangat penting dalam menilai dampak lingkungan dari nanomaterial. Studi menunjukkan

bahwa penerapan LCA pada nanomaterial dalam polimer seperti polipropilena, polietilena, dan asam polilaktat—dengan nanopartikel seperti perak, tanah liat, dan TiO2—dapat meningkatkan fungsi produk, seperti pengawetan makanan dan komunikasi, sekaligus mengurangi berat material dan memperpanjang umur simpan produk (Ros-Lis & Benitez, 2024).

LCA untuk *Engineered Nanomaterials* (ENMs) dalam remediasi lingkungan semakin populer, terutama dalam prosedur pengolahan air, meskipun terdapat tantangan seperti keterbatasan data spesifik terkait nanoteknologi (Quici et al., 2023). Selain itu, tahapan aplikasi nanomaterial yang membutuhkan banyak energi telah diidentifikasi sebagai kontributor utama terhadap permintaan energi kumulatif dan pemanasan global (Alves et al., 2023). Titik-titik kritis lingkungan ini memberikan peluang untuk mengembangkan strategi mitigasi. Misalnya, bionanokomposit, kombinasi polimer alami dengan nanopartikel, menyediakan solusi ramah lingkungan untuk berbagai sektor, termasuk pemurnian air dan pengobatan regeneratif, yang menegaskan pentingnya LCA dalam menilai dampak lingkungan dan kelayakan jangka panjang dari produk tersebut (Riaz et al., 2024). LCA memainkan peran kunci dalam mengidentifikasi tahap-tahap yang membutuhkan energi tinggi dalam proses nanoteknologi. Identifikasi ini mendukung pengembangan strategi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan konsumsi energi. Studi menunjukkan bahwa tahap energi tinggi, seperti produksi bahan baku dan penggunaan pelarut, merupakan penyumbang utama pemanasan global dan permintaan energi kumulatif dalam aplikasi nanomaterial (Alves et al., 2023). Dengan memanfaatkan LCA, titik-titik kritis dalam produksi nanomaterial dapat diidentifikasi dan diatasi, memungkinkan optimasi proses sebelum diterapkan dalam skala besar. Misalnya, penilaian sintesis *Single Chain Polymer Nanoparticles* (SCNPs) telah menunjukkan efektivitas LCA dalam mengevaluasi berbagai skenario dan dampak lingkungan (Galant et al., 2023).

Sebagai alat evaluasi yang komprehensif, LCA memungkinkan analisis menyeluruh terhadap dampak lingkungan dari produk dan proses, sekaligus mendukung adopsi praktik yang bertanggung jawab dalam pengambilan keputusan (Quici et al., 2023; Meskers et al., 2023; Saavedra & Osma, 2024). Misalnya, penerapan teknologi inovatif seperti inklusi nanopartikel dalam berbagai sektor industri, termasuk industri keramik, dapat mengidentifikasi peluang untuk mengurangi konsumsi energi dan bahan baku, sehingga secara signifikan mengurangi dampak lingkungan (Saavedra & Osma, 2024).

Selain itu, penerapan LCA pada ENMs untuk remediasi lingkungan menunjukkan komitmen ilmiah dalam menilai secara mendalam dampak lingkungan dari prosedur pengolahan limbah nano. Hal ini memperkuat peran LCA sebagai instrumen penting dalam optimalisasi proses sebelum implementasi berskala besar, sekaligus memastikan keberlanjutan dalam pengembangan teknologi nano (Quici et al., 2023).

3. Aplikasi Nanoteknologi Hijau

Nanoteknologi Hijau (GNT) menghadirkan solusi inovatif untuk masalah global, mulai dari energi berkelanjutan hingga pengelolaan limbah. Dengan aplikasi yang luas, termasuk dalam pengolahan air, pertanian, dan pengendalian polusi, GNT mendukung pencapaian SDGs, seperti SDG 2, 6, 7, 11, 12, dan 13. Penelitian lebih lanjut, kolaborasi lintas sektor, dan regulasi yang tepat akan memastikan teknologi ini menjadi bagian integral dari pembangunan berkelanjutan.

GNT meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya di sektor pertanian melalui nanomaterial dan nanodevice (Sekton, 2010).

1. Optimalisasi Pupuk dan Pestisida

Sistem pengantaran berbasis nano meningkatkan efisiensi pupuk dan pestisida, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan (Lamba & Garg, 2018).

2. Sensor dan Kemasan Pangan

Nanosensor mendukung pertanian presisi dengan memantau kesehatan tanaman, kebutuhan air, dan manajemen hama (Raliya et al., 2018). Nanoteknologi juga digunakan dalam kemasan pangan untuk memperpanjang umur simpan dan mendeteksi kontaminan (Tyagi et al., 2022).

3. Akuakultur Berkelanjutan

GNT mendukung akuakultur dengan meningkatkan efisiensi penggunaan pakan dan air. Inovasi ini mendukung SDG 2 (Mengakhiri Kelaparan) dan SDG 12.

4. Tantangan dan Keterbatasan

Nanoteknologi Hijau (GNT) memiliki potensi besar untuk mendukung praktik berkelanjutan dan mengurangi dampak lingkungan. Namun, teknologi ini menghadapi beberapa hambatan dan keterbatasan yang perlu diatasi. Salah satu masalah utama adalah kurangnya metode standar untuk mengevaluasi dan membandingkan bagaimana nanomaterial memengaruhi lingkungan. Hal ini menyulitkan untuk mendapatkan Life Cycle Assessment (LCA) yang konsisten dan terpercaya serta memperumit perbandingan keberlanjutan. Untuk menghindari dampak lingkungan yang tidak terduga, diperlukan metode yang baik untuk membuang dan mendaur ulang limbah nanomaterial, karena nanomaterial memiliki sifat yang berbeda dibandingkan material biasa. Risiko kesehatan dan keselamatan dari paparan nanomaterial belum sepenuhnya dipahami, sehingga diperlukan aturan keselamatan yang kuat untuk melindungi pekerja, konsumen, dan lingkungan.

Selain itu, hukum dan regulasi terkait nanoteknologi sering kali tidak dapat mengikuti perkembangan pesat di bidang ini, menciptakan ketidakpastian bagi bisnis dan pemangku kepentingan lainnya. Kekosongan regulasi ini menjadi tantangan bagi pembuat kebijakan yang berusaha mengatur GNT secara efektif tanpa menghambat inovasi. Beberapa solusi GNT mungkin melibatkan

kompromi antara manfaat lingkungan dan dampak lainnya. Sebagai contoh, menciptakan teknologi yang lebih hemat energi mungkin memerlukan bahan yang kurang ramah lingkungan. Persepsi dan pemahaman publik terhadap nanoteknologi juga dapat memengaruhi tingkat penerimaan dan penggunaannya. Hal ini menunjukkan pentingnya meningkatkan kesadaran tentang kelebihan dan kekurangan GNT untuk mendapatkan dukungan dan kepercayaan publik.

Untuk mengatasi tantangan ini, diperlukan investasi awal dan evaluasi mendalam tentang manfaat praktik hijau sebelum diterapkan secara luas. Kolaborasi antara ahli dalam bidang nanoteknologi, ilmu lingkungan, ilmu material, dan kebijakan sangat penting. Penelitian lintas disiplin dan berbagi pengetahuan diperlukan untuk menciptakan solusi yang holistik dan berkelanjutan. Meskipun masalah ini sulit diatasi, dengan penelitian, kolaborasi, dan inovasi yang terus dilakukan, hambatan-hambatan ini dapat dilampaui. Dengan demikian, GNT dapat memberikan kontribusi besar dalam melindungi lingkungan dan membawa kita menuju masa depan yang lebih baik bagi planet ini dan umat manusia.

1. Desalinasi dan Pemurnian Air

Teknologi desalinasi berbasis nanomaterial membantu mengubah air laut menjadi air layak konsumsi, mendukung SDG 6 (Air Bersih dan Sanitasi) (Shivalingam et al., 2022).

2. Efisiensi dan Konservasi Air

Sistem berbasis nanoteknologi meningkatkan efisiensi distribusi, pemantauan kualitas, dan konservasi sumber daya air (Silva et al., 2022).

5. Tantangan dan Harapan

Dalam bidang *Nanoteknologi Hijau* (GNT), terdapat dua faktor utama yang mendorong inovasi dan tanggung jawab lingkungan. Pertama, kemajuan dalam sintesis dan metode desain nanomaterial, termasuk strategi *bottom-up* dan prosedur yang terinspirasi oleh alam, menciptakan peluang untuk menghasilkan nanomaterial dengan sifat unggul. Nanomaterial yang dirancang secara khusus untuk aplikasi tertentu dapat membuka peluang baru di berbagai sektor industri, dari energi hingga pengolahan limbah. Kedua, penggabungan nanoteknologi dengan teknologi ramah lingkungan lainnya, seperti pengolahan air limbah dan energi terbarukan, menawarkan potensi besar. Kolaborasi ini menciptakan sinergi yang bermanfaat, menghasilkan solusi inovatif untuk berbagai tantangan lingkungan yang kompleks. Kombinasi nanoteknologi dengan pendekatan keberlanjutan memungkinkan penerapan teknologi yang efisien dan berkelanjutan dalam berbagai bidang. Kolaborasi antara akademisi, dunia usaha, pembuat kebijakan, dan masyarakat sipil berperan penting dalam mempercepat inovasi. Pendekatan ini tidak hanya memastikan pengembangan teknologi yang bertanggung jawab, tetapi juga memungkinkan penerapan solusi jangka panjang untuk mengatasi masalah

global. Dengan memanfaatkan potensi GNT untuk menjawab kebutuhan masyarakat dan lingkungan, sambil terus mendorong kemajuan teknologi, kita dapat membangun masa depan yang tangguh dan berkelanjutan. Teknologi desalinasi berbasis nanomaterial, misalnya, memungkinkan konversi air laut menjadi air layak konsumsi. Inovasi ini mendukung pencapaian *Sustainable Development Goal* (SDG) 6, yaitu *Air Bersih dan Sanitasi* (Shivalingam et al., 2022). Selain itu, sistem berbasis nanoteknologi juga meningkatkan efisiensi dalam distribusi air, pemantauan kualitas, dan konservasi sumber daya air. Inovasi ini membantu mengurangi pemborosan air dan memastikan pemanfaatan yang lebih efektif (Silva et al., 2022). Dengan pendekatan ini, GNT memainkan peran penting dalam mengatasi masalah air global, memastikan ketersediaan air bersih yang berkelanjutan bagi generasi saat ini dan mendatang.

SIMPULAN DAN SARAN

Pendekatan berbasis nanoteknologi memiliki peran penting dalam mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), termasuk energi bersih, air bersih dan sanitasi, pertanian berkelanjutan, serta aksi iklim. Sebuah tinjauan tentang Nanoteknologi Hijau (GNT) mengeksplorasi keterkaitan ini dengan menyoroti prinsip-prinsip dasar GNT yang mendorong pengembangan nanomaterial ramah lingkungan dan aplikasinya yang memperhatikan aspek ekologi.

DAFTAR PUSTAKA

Aithal, S., & Aithal, P. S. (2021). Green nanotechnology innovations to realize UN sustainable development goals 2030. *International Journal of Applied Engineering and Management Letters (IJAEML)*, *5*(2), 96-105. https://doi.org/10.47992/ijaeml.2581.7000.0106.

Ali, Q. A., & Ghareeb, O. A. (2023). Achieving Sustainable Development Goals by Wastewater Management. *Zeta Repository*, *19*, 99-108.

Allouzi, M. M. A., Allouzi, S., Al-Salaheen, B., Khoo, K. S., Rajendran, S., Sankaran, R., Sy-Toan, N., & Show, P. L. (2022). Current advances and future trend of nanotechnology as microalgae-based biosensor. *Biochemical Engineering Journal, 187,* 108653. https://doi.org/10.1016/J.BEJ.2022.108653

Altaf, F., Hashmi, M. Z., Farooq, U., Rehman, Z. U., Hameed, M. U., Batool, R., Pongpiachan, S. (2022). Nanotechnology to treat the environmental micropollutants. *Environmental Micropollutants: A Volume in Advances in Pollution Research.* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90555-8.00017-9

Alves, S., Gonçalves, M., Monteiro, H., Moura, B., Godina, R., & Almeida, J. (2023). Life cycle assessment of nanotechnology: Carbon footprint and energy analysis. *Environmental Science and Engineering.* https://doi.org/10.1007/978-3-031-43559-1_23

Annanouch, F. E., Casanova-Cháfer, J., Alagh, A., Alvarado, M., González, E., & Llobet, E. (2021). Nanosensors for food logistics. In *Nanosensors for Smart Agriculture.* https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824554-5.00022-7

Bognár, S., Putnik, P., & Merkulov, D. Š. (2022). Sustainable green nanotechnologies for innovative purifications of water: Synthesis of the nanoparticles from renewable sources. *Nanomaterials.* https://doi.org/10.3390/nano12020263

Boullouz, S., Faquir, S., & Yahyaouy, A. (2022, January). A new approach to manage the energy flow in a hybrid renewable energy system based on green hydrogen. In *International Conference on Digital Technologies and Applications* (pp. 562-570). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-02447-4_58.

Chausali, N., Saxena, J., & Prasad, R. (2023). Nanotechnology as a sustainable approach for combating the environmental effects of climate change. *Journal of Agriculture and Food Research, 12,* 100541.

https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100541

Corsi, I., Venditti, I., Trotta, F., & Punta, C. (2023). Environmental safety of nanotechnologies: The eco-design of manufactured nanomaterials for environmental remediation. *Science of The Total Environment*, *864*, 161181. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161181.

De, B., & Goswami, T. K. (2022). Nanobiotechnology: A green solution. In *Biotechnology for Zero Waste Systems.* https://doi.org/10.1002/9783527832064.ch25

Demming, A. (2011). Big challenges and nanosolutions. *Nanotechnology, 22*(29), 290201. https://doi.org/10.1088/0957-4484/22/29/290201

Dhahri, S., & Omri, A. (2018). Entrepreneurship contribution to the three pillars of sustainable development: What does the evidence really say?. *World Development*, *106*, 64-77. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2018.01.008.

Eldos, H. I., Zouari, N., Saeed, S., & Al-Ghouti, M. A. (2022). Recent advances in the treatment of PAHs in the environment: Application of nanomaterial- based technologies. *Arabian Journal of Chemistry*, *15*(7), 103918. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.103918.

Fan, X., Wei, G., & Quan, X. (2023). Carbon nanomaterial-based membranes for water and wastewater treatment under electrochemical assistance. *Environmental Science: Nano*, *10*(1), 11-40. https://doi.org/10.1039/d2en00545j.

Fu, K., Wang, Y., Yan, C., Yao, Y., Chen, Y., Dai, J., Lacey, S., Wang, Y., Wan, J., Li, T., Wang, Z., Xu, Y., & Hu, L. (2016). Graphene oxide-based electrode inks for 3D-printed lithium-ion batteries. *Advanced Materials, 28*(13), 2587– 2594. https://doi.org/10.1002/adma.201505391

Galant, O., Diesendruck, C., & Spatari, S. (2023). Environmental assessment of single-chain polymer nanoparticles: Prospects for cleaner production. *Research Square.* https://doi.org/10.21203/RS.3.RS-2800145/V1

Gaur, R. (2021). Environmental impact and life cycle analysis of green nanomaterials. *Green Functional Nanomaterials in Environmental Applications.* https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823137-1.00018-X

Geetha Varma, V. (2022). Water-efficient technologies for sustainable development. In *Elsevier, Vol. 6,* 101–128. https://doi.org/10.1016/b978-0- 323-91838-1.00009-9

Ghosh, S., & Subudhi, S. (2022). Developments in fuel cells and electrochemical batteries using nanoparticles and nanofluids. *Energy Storage.* https://doi.org/10.1002/EST2.288

Gul, M. Z., Rupula, K., & Rao, B. S. (2022). Nanobioremediation: A novel application of green-nanotechnology in environmental cleanup. In *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation.* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90452-0.00040-2

Gulati, S., Lingam, B. H. N., Kumar, S., Goyal, K., Arora, A., & Varma, R. S.

(2022). Improving air quality with functionalized carbon nanotubes: Sensing and remediation applications in the real world. *Chemosphere.* https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134468

Intisar, A., Ramzan, A., Sawaira, T., Kareem, A. T., Hussain, N., Din, M. I., Bilal, M., & Iqbal, H. M. N. (2022). Occurrence, toxic effects, and mitigation of pesticides as emerging environmental pollutants using robust nanomaterials: A review. *Chemosphere.* https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133538

Jung, S., Myung, Y., Das, G. S., Bhatnagar, A., Park, J. W., Tripathi, K. M., & Kim, T. (2020). Carbon nano-onions from waste oil for application in energy storage devices. *New Journal of Chemistry, 44*(18), 7369–7375. https://doi.org/10.1039/d0nj00699h

Kassim, J. (2022). Progress review on advancement of solar cell nanotechnology in harvesting clean energy. *Journal of Equity in Science and Sustainable Development, 5*(1), 76–84.

Kaushik, S. (2021). Nanoproducts: Biomedical, environmental, and energy applications. In *Handbook of Consumer Nanoproducts*.

https://doi.org/10.1007/978-981-15-6453-6_63-1

Khan, S. H. (2020). Green nanotechnology for the environment and sustainable development. *Green materials for wastewater treatment,* 13-46.

Khanna, N., Singh, S., & Chatterji, T. (2022). Potential application of nanotechnology in wastewater management: A paradigm shift. *Materials Letters, 315,* 131975. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.131975

Lamba, A., & Garg, V. (2018). Nanotechnology approach in food science: A review. *International Journal of Food Science and Nutrition, 3*(2), 183–186. https://doi.org/10.15740/HAS/FSRJ/9.2/441-447

Lu, Y., & Ozcan, S. (2015). Green nanomaterials: On track for a sustainable future. *Nano Today*, *10*(4), 417-420. https://doi.org/10.1016/j.nantod.2015.04.010.

Madani, M., Hosny, S., Alshangiti, D. M., Nady, N., Alkhursani, S. A., Alkhaldi, H., Al-Gahtany, S. A., Ghobashy, M. M., & Gaber, G. A. (2022). Green synthesis of nanoparticles for varied applications: Green renewable resources and energy-efficient synthetic routes. *Nanotechnology Reviews, 11*(1), 731–759. https://doi.org/10.1515/NTREV-2022-0034/HTML

Mathur, S., Singh, D., & Ranjan, R. (2022). Remediation of heavy metal (loid) contaminated soil through green nanotechnology. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, *6*, 932424. https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.932424.

Menegaldo, M., Livieri, A., Isigonis, P., Pizzol, L., Tyrolt, A., Zabeo, A., & Marcomini, A. (2023). Environmental and economic sustainability in cultural heritage preventive conservation: LCA and LCC of innovative nanotechnology-based products. *Cleaner Environmental Systems*, *9*, 100124. https://doi.org/10.1016/j.cesys.2023.100124.

Meskers, C., Bartie, N. J., & Reuter, M. A. (2023). Life cycle assessment (LCA). In *Handbook of Recycling: State-of-the-art Practices and Analytical Sciences.* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85514-3.00010-5

Mir, S., Naderifar, A., morad Rahidi, A., & Alaei, M. (2022). Recent advances in oil/water separation using nanomaterial-based filtration methods for crude oil processing-a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, *215*, 110617. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2022.110617.

Morici, E., Carroccio, S. C., Bruno, E., Scarfato, P., Filippone, G., & Dintcheva, N.

T. (2022). Recycled (bio)plastics and (bio)plastic composites: A trade opportunity in a green future. *Polymers, 14*(10), 2038. https://doi.org/10.3390/polym14102038

Mukhopadhyay, R., Sarkar, B., Khan, E., Alessi, D. S., Biswas, J. K., Manjaiah, K. M., Eguchi, M., Wu, K. C. W., Yamauchi, Y., & Ok, Y. S. (2021). Nanomaterials for sustainable remediation of chemical contaminants in water and soil. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 52*(15), 2611–2660. https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1886891

Naskar, J., Boatemaa, M. A., Rumjit, N. P., Thomas, G., George, P. J., Lai, C. W., Mousavi, S. M., & Wong, Y. H. (2022). Recent advances of nanotechnology in mitigating emerging pollutants in water and wastewater: Status, challenges, and opportunities. *Water, Air, & Soil Pollution*. https://doi.org/10.1007/s11270-022-05611-y

Nasrollahzadeh, M., Sajjadi, M., Sajadi, S. M., & Issaabadi, Z. (2019). Green nanotechnology. In *Interface science and technology* (Vol. 28, pp. 145-198). Elsevier. https://doi.org/10. 1016/B978-0-12-813586-0.00005-5.

Ncube, A., Mtetwa, S., Bukhari, M., Fiorentino, G., & Passaro, R. (2023). Circular economy and green chemistry: the need for radical innovative approaches in the design for new products. *Energies*, *16*(4), 1752.
https://doi.org/10.3390/en16041752.

Omran, B. A., & Baek, K. H. (2022). Valorization of agro-industrial biowaste to green nanomaterials for wastewater treatment: Approaching green chemistry and circular economy principles. *Journal of Environmental Management*, *311*, 114806. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.114806.

Pandit, M. A., Bhardwaj, K., & Kaur, J. (2023). Microbial nanotechnology: a potential tool for a sustainable environment. In *Environmental applications of microbial nanotechnology* (pp. 217-230). Elsevier. https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91744-5.00010-2.

Pansambal, S., Roy, A., Mohamed, H. E. A., Oza, R., Vu, C. M., Marzban, A., Chauhan, A., Ghotekar, S., & Murthy, H. C. A. (2022). Recent developments on magnetically separable ferrite-based nanomaterials for removal of environmental pollutants. *Journal of Nanomaterials.* https://doi.org/10.1155/2022/8560069

Parkash, V., Chauhan, A., Gaur, A., & Rai, N. (2022). Advances in bionic approaches for agriculture and forestry development. In *Digital Agriculture Revolution: Innovations and Challenges Through Technological Disruptions.* https://doi.org/10.1002/9781119823469.CH9

Patil, P. B., Holkar, C. R., & Pinjari, D. V. (2022). Green nanomaterials as surfaces and coatings. In *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology.* https://doi.org/10.1007/978-3-030-69023-6_73-1

Quici, N., Crespi, J., & Montesinos, V. N. (2023). LCA applied to nanomaterials for environmental remediation: Advances and challenges. *Nanoparticles for Sustainable Environmental Remediation Agents.* https://doi.org/10.1039/bk9781837670215-00264

Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C., & Biswas, P. (2018). Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry, 66*(26), 6487–6503. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.7b02178

Riaz, F., Rasul, I., Azeem, F., Zubair, M., Nadeem, H., Imran, M., Muzammil, A., Afzal, M., Siddique, M. H. (2024). Environmental impact, health implications, and life cycle assessment of bionanocomposites. *Advances in Bionanocomposite Materials: Applications and Life Cycle.* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91764-3.00009-7

Rodrigues, S. M., Demokritou, P., Dokoozlian, N., Hendren, C. O., Karn, B., Mauter, M. S., & Lowry, G. V. (2017). Nanotechnology for sustainable

food production: promising opportunities and scientific challenges. *Environmental Science: Nano*, *4*(4), 767-781. https://doi.org/10.1039/c6en00573j.

Ros-Lis, J. V., & Benitez, M. (2024). Recent advances in life cycle assessment of nanomaterials for packaging applications. *Nanostructured Materials for* *Vol. 2. No.1* ***e-ISSN: 4046- 6210***

Food Packaging Applications. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99525-2.00009-8

Saavedra, E. L., & Osma, J. F. (2024). Impact of nanoparticle additions on life cycle assessment (LCA) of ceramic tile production. *Nanomaterials, 14*(11), 910. https://doi.org/10.3390/nano14110910

Saleem, H., Zaidi, S. J., Ismail, A. F., & Goh, P. S. (2022). Advances of nanomaterials for air pollution remediation and their impacts on the environment. *Chemosphere, 287,* 132083. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132083

Scott, N. R., Chen, H., & Cui, H. (2018). Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *Journal of agricultural and food chemistry*, *66*(26), 6451-6456. https://doi.org/10.1021/ACS.JAFC.8B00964/ASSET/IMAGES/MEDIUM/ JF-2018-00964C_0001.GIF.

Sekton, B. (2010). Food nanotechnology—An overview. *Nanotechnology, Science and Applications, 3,* 1. https://doi.org/10.2147/nsa.s8677

Shalaby, S. M., Elfakharany, M. K., Mujtaba, I. M., Moharram, B. M., & Abosheiasha, H. F. (2022). Development of an efficient nano-fluid cooling/preheating system for PV-RO water desalination pilot plant. *Energy Conversion and Management.* https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115960

Shastri, D. V., Rajkumar, S., Donald Raj, J. J., Babu, S. K., & Arunachalam, K. D. (2024). Green and sustainable future and conclusion. *Industrial Applications of Nanoceramics.* https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88654-3.00029-9

Shivalingam, C., Mohan, L., Ganapathy, D., Shanmugam, R., Pitchiah, S., Ramadoss, R., & Sundramoorthy, A. K. (2022). Current overview on the role of nanoparticles in water desalination technology. *Current Analytical Chemistry, 18*(9), 989–998. https://doi.org/10.2174/1573411018666220805112549

Silva, G. M. E., Campos, D. F., Brasil, J. A. T., Tremblay, M., Mendiondo, E. M., & Ghiglieno, F. (2022). Advances in technological research for online and in situ water quality monitoring: A review. *Sustainability, 14*(9), 5059. https://doi.org/10.3390/SU14095059

Singh, B. P., Sharma, K., Tyagi, S., Gautam, D., Chaudhary, M., Kumar, A., &

Gautam, Y. K. (2023). Green and Sustainable Technology for Clean Energy Production: Applications. In *Handbook of Green and Sustainable Nanotechnology: Fundamentals, Developments and Applications* (pp. 1-23). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3- 030-69023-6_64-1.

Singh, K. K., Singh, A., & Rai, S. (2021). A study on nanomaterials for water purification. *Materials Today: Proceedings, 51,* 1157–1163. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.116

Sonu, R. G. M., Pathania, D., Abhimanyu, U. R., Rustagi, S., Huh, Y. S.,

Gupta, V. K., Kaushik, A., & Chaudhary, V. (2023). Agro-waste to sustainable energy: A green strategy of converting agricultural waste to nano-enabled energy applications. *Science of the Total Environment, 875,* 162667. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162667

Stephen Inbaraj, B., & Chen, B. H. (2016). Nanomaterial-based sensors for detection of foodborne bacterial pathogens and toxins as well as pork adulteration in meat products. *Journal of Food and Drug Analysis, 24*(1), 15–28. https://doi.org/10.1016/j.jfda.2015.05.001

Swain, P. (2023). Application of nanotechnology in biology and its impact on climate change. In *Impact of Climate Change on Livestock Health and Production* (pp. 243–250). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781003364689-27/APPLICATION- NANOTECHNOLOGY-BIOLOGY-IMPACT-CLIMATE-CHANGE- PRIYABRAT-SWAIN

Tyagi, P. K., Mishra, M., Khan, N., Tyagi, S., & Sirohi, S. (2016). Toxicological study of silver nanoparticles on gut microbial community probiotic. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *5*, 36-43. https://doi.org/10.1016/j.enmm.2016.01.003.

Tyagi, P. K., Tyagi, S., Srivastava, V., Gola, D., Arya, A., & Chauhan, N. (2022). Control of foodborne pathogens using nanotechnology. In *Recent Advances in Food Biotechnology*. https://doi.org/10.1007/978-981-16-8125-7_22

Vellayappan, M. V., Jaganathan, S. K., & Manikandan, A. (2016). Nanomaterials as a game changer in the management and treatment of diabetic foot ulcers. *RSC advances*, *6*(115), 114859-114878. https://doi.org/10.1039/C6RA24590K.

Yarima, A., Ali, R., Abdullahi, A. A., & Idris, Z. (2020). Nanotechnology: Review on emerging techniques in remediating water and soil pollution. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management, 24*(5), 933–941. https://doi.org/10.4314/jasem.v24i5.31

Younis, S. A., Kim, K. H., Shaheen, S. M., Antoniadis, V., Tsang, Y. F., Rinklebe, J., Deep, A., & Brown, R. J. C. (2021). Advancements of nanotechnologies in crop promotion and soil fertility: Benefits, life cycle assessment, and legislation policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 152,* 111686. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111686

Zha, R., Shi, T., He, L., & Zhang, M. (2022). Chemistry and nanotechnology-oriented strategies toward nanocellulose for human water treatment. *Advanced Sustainable Systems, 6*(3), 2100302. https://doi.org/10.1002/adsu.202100302