

PENERAPAN TEKNOLOGI NANO PADA SEKTOR LINGKUNGAN, ENERGI, DAN PERTANIAN: TINJAUAN KRITIS

Applications of Nanotechnology in Environment, Energy, and Agricultural Sectors: A Critical Review

A.H. Syaeful Anwar¹, Ropiudin^{2*}, Kavadya Syska³, Siswantoro²

¹ Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nahdlatul Ulama Purwokerto

² Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman

³ Fakultas Teknologi Industri, Universitas Nahdlatul Ulama Al Ghazali Cilacap

* Email: ropiudin@unsoed.ac.id

DOI: <http://dx.doi.org/10.20884/1.jaber.2024.5.2.14505>

Naskah ini diterima pada 3 Januari 2025; revisi pada 27 Januari 2025;
disetujui untuk dipublikasikan pada 31 Januari 2025

ABSTRAK

Teknologi nano menawarkan potensi besar dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan di sektor lingkungan, energi, dan pertanian. Pendekatan sintesis partikel nano berbasis tumbuhan (*phytosynthesis*) muncul sebagai metode ramah lingkungan yang menggantikan bahan kimia beracun dengan metabolit alami, menghasilkan partikel nano yang stabil, seragam, dan ekonomis. Aplikasi teknologi nano dalam fitoremediasi memanfaatkan kemampuan tanaman hiperakumulator untuk menyerap polutan dan mengubahnya menjadi material bernilai tinggi, sementara dalam bioenergi, partikel nano berperan sebagai katalis yang meningkatkan konversi lignoselulosa menjadi bioetanol serta produksi biogas. Di bidang pertanian, pupuk-nano dan pestisida-nano berbasis logam oksida seperti ZnO dan CuO meningkatkan efisiensi nutrisi dan perlindungan tanaman dari patogen, didukung oleh karbon *nanotube* (CNTs) yang memperbaiki struktur tanah dan penyerapan air. Namun demikian, tantangan seperti toksisitas partikel nano terhadap lingkungan, bioakumulasi dalam rantai makanan, dan gangguan pada mikroba tanah memerlukan perhatian serius. Selain itu, pendekatan berbasis data seperti kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* / AI) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning* / ML) menyediakan solusi untuk mengoptimalkan desain partikel nano, meningkatkan stabilitas, dan meminimalkan dampak toksik. Integrasi teknologi nano dengan pendekatan ini diyakini mampu mempercepat inovasi di berbagai sektor sekaligus mendukung keberlanjutan ekosistem secara global.

Kata kunci: teknologi nano, *phytosynthesis*, fitoremediasi, bioenergi, pertanian

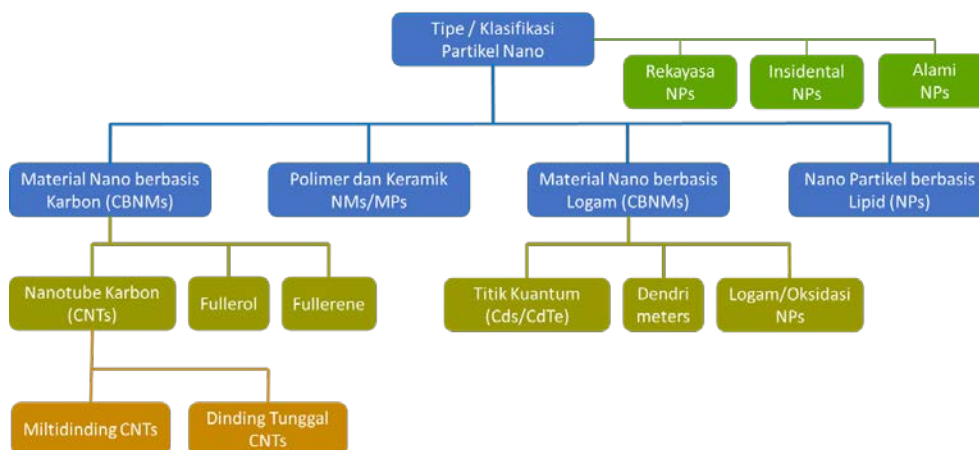
ABSTRACT

Nanotechnology holds immense potential in enhancing efficiency and sustainability across the environmental, energy, and agricultural sectors. Plant-based nanoparticle synthesis (*phytosynthesis*) has emerged as an eco-friendly method that replaces toxic chemicals with natural metabolites, producing nanoparticles that are stable, uniform, and cost-effective. The application of nanotechnology in phytoremediation leverages the ability of hyperaccumulator plants to absorb pollutants and transform them into high-value materials. Meanwhile, in bioenergy, nanoparticles act as catalysts to accelerate lignocellulose conversion into bioethanol and enhance biogas production. In agriculture, nano-fertilizers and nano-pesticides based on metal oxides, such as ZnO and CuO, improve nutrient efficiency and plant protection against pathogens, supported by carbon nanotubes (CNTs) that enhance soil structure and water absorption. Nevertheless, challenges such as nanoparticle toxicity to the environment, bioaccumulation in the food chain, and disruption of soil microbes require serious attention. Additionally, data-driven approaches like artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) offer solutions to optimize nanoparticle design, improve stability, and minimize toxic impacts. Integrating nanotechnology with these approaches is believed to accelerate innovations in various sectors while supporting global ecosystem sustainability.

Keywords: nanotechnology, *phytosynthesis*, phytoremediation, bioenergy, agriculture

PENDAHULUAN

Teknologi nano telah berkembang menjadi salah satu disiplin ilmu terkemuka dengan dampak signifikan pada berbagai sektor, seperti lingkungan, energi, dan pertanian. Teknologi ini mendasari manipulasi materi pada skala nanometer untuk menghasilkan sifat fisikokimia yang unik, seperti luas permukaan yang besar, kapasitas adsorpsi tinggi, stabilitas yang lebih baik, dan kemampuan katalitik yang unggul dibandingkan material konvensional (Khan *et al.*, 2022).



Gambar 1. Berbagai jenis partikel nano/material nano skala nano (berbasis C; berbasis logam; berbasis polimer/keramik; berbasis lipid; dan lain-lain)

Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan partikel nano (NP) telah merambah sektor agronomi dan ekosistem (Singh *et al.*, 2021). Pada bidang energi, partikel nano telah berkontribusi pada pengembangan teknologi energi bersih, seperti produksi bioenergi dan fotokatalisis untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (Sharma *et al.*, 2022). Di sektor pertanian, teknologi nano digunakan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya melalui pupuk-nano, pestisida-nano, serta teknologi penyampaian nutrisi yang lebih presisi (Yadav *et al.*, 2023). Selain itu menurut Yadav *et al.* (2018), aplikasi dalam fitoremediasi dan bioremediasi menunjukkan potensi besar dalam mengatasi kontaminasi lingkungan yang semakin kompleks.

Meskipun partikel nano menawarkan berbagai manfaat, menurut Zhang *et al.* (2022) banyak teknik sintesis tradisional menggunakan bahan kimia beracun, menghasilkan limbah berbahaya, dan berdampak negatif pada lingkungan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan alternatif yang ramah lingkungan. Sintesis partikel nano berbasis tumbuhan (*phytosynthesis*) telah muncul sebagai teknologi hijau yang menjanjikan (Anand *et al.*, 2022). Melalui fitokimia yang dimiliki tanaman, proses ini memungkinkan sintesis partikel nano tanpa menggunakan bahan kimia beracun, menjadikannya metode yang lebih aman dan berkelanjutan (Shafey, 2020).

Metode teknologi nano ini tidak hanya mengurangi dampak lingkungan tetapi juga membuka peluang untuk integrasi lebih lanjut dengan teknologi bioenergi, seperti produksi biogas atau bioetanol dari tanaman hiperakumulator (Mandal *et al.*, 2024). Dengan demikian, pendekatan ini menciptakan ekosistem yang lebih sirkular, di mana tanaman berfungsi baik sebagai agen remedi maupun penghasil energi terbarukan.

Terlepas dari manfaatnya, Hofmann *et al.* (2020) menjelaskan bahwa adopsi teknologi nano secara luas dalam bidang lingkungan dan pertanian menghadapi beberapa tantangan besar. Salah satu tantangan utama adalah akumulasi partikel nano dalam lingkungan yang dapat memengaruhi organisme non-target, seperti mikroorganisme tanah dan fauna air (Punniyakotti *et al.*, 2024).

Studi tentang dampak jangka panjang partikel nano pada ekosistem masih terbatas, terutama dalam hal toksisitas kronis dan bioakumulasi dalam rantai makanan.

Selain itu, kurangnya pemahaman tentang mekanisme interaksi antara tanaman dan partikel nano menciptakan kesenjangan pengetahuan yang signifikan. Penelitian dan kajian lebih lanjut diperlukan untuk memahami bagaimana partikel nano memengaruhi metabolisme tanaman, pola transpor, dan efektivitas dalam aplikasi agronomi.

Relevansi teknologi nano dalam globalisasi tidak dapat diabaikan, terutama dalam menghadapi tantangan krusial abad ke-21, seperti perubahan iklim, keamanan pangan, dan degradasi lingkungan. Konferensi Perubahan Iklim Paris (COP21) menekankan perlunya inovasi hijau yang mendukung dekarbonisasi dan pembangunan berkelanjutan (Matešić *et al.*, 2023). Dalam hal ini, menurut Infante-Neta *et al.* (2024) bahwa integrasi partikel nano yang dihasilkan secara hijau dengan praktik bioenergi dan agronomi memiliki potensi signifikan untuk berkontribusi pada pencapaian tujuan keberlanjutan global.

Kajian ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai peran partikel nano berbasis tumbuhan dalam berbagai sektor dan menyelaraskan manfaat serta tantangannya dalam keberlanjutan global. Dengan mengevaluasi berbagai teknik sintesis, aplikasi, serta risiko yang terkait dengan interaksi partikel nano dan tanaman, penelitian ini menawarkan wawasan baru tentang cara mengintegrasikan teknologi nano secara strategis untuk mendukung keberlanjutan lingkungan dan efisiensi agronomi.

Tujuan khusus ulasan kritis ini yaitu: (1) Menganalisis teknik sintesis nanopartikel berbasis tumbuhan yang lebih ramah lingkungan, (2) Mengeksplorasi aplikasi teknologi nano dalam fitoremediasi, bioenergi, dan pertanian, (3) Mengevaluasi tantangan utama, seperti toksisitas nanopartikel terhadap lingkungan dan akumulasi dalam rantai makanan, dan (4) Menyusun strategi untuk integrasi teknologi nano dengan pendekatan desain berbasis data, seperti kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin.

METODE PENELITIAN

Pendekatan Penelitian

Kajian ini menggunakan pendekatan tinjauan kritis (critical review) untuk mengevaluasi dan menganalisis berbagai teknik dan strategi yang terkait dengan interaksi partikel nano dan tanaman serta dampaknya pada energi, lingkungan, dan pertanian. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi tren, tantangan, dan peluang dalam bidang ini.

Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sebagai berikut: (1) Literatur yang relevan: dilakukan pencarian literatur yang luas untuk mengumpulkan informasi dari berbagai sumber, termasuk jurnal ilmiah, artikel konferensi, dan publikasi terkait lainnya. Fokus utama adalah pada penelitian terbaru yang membahas interaksi partikel nano dan tanaman serta dampaknya pada energi, lingkungan, dan pertanian. (2) Kriteria inklusif dan eksklusif: penetapan kriteria untuk memilih studi yang relevan, termasuk kualitas penelitian, relevansi topik, dan kontribusi terhadap pemahaman tentang interaksi partikel nano dan tanaman serta dampaknya pada energi, lingkungan, dan pertanian.

Analisis dan Sintesis Data

Analisis dan sintesis data dalam ulasan kritis ini dilakukan melalui beberapa tahap berikut: (1) Kategorisasi: Data yang dikumpulkan dari berbagai literatur dikategorikan berdasarkan tema utama yang relevan, seperti teknik sintesis partikel nano berbasis tumbuhan (*phytosynthesis*),

metode karakterisasi, aplikasi dalam fitoremediasi dan pengelolaan lingkungan, serta penerapan dalam sektor pertanian dan bioenergi. (2) Evaluasi Metodologi: Dilakukan evaluasi kritis terhadap metodologi yang digunakan dalam berbagai studi, mencakup teknik sintesis partikel nano, jenis tumbuhan yang digunakan, parameter proses yang dioptimalkan (seperti pH, suhu, dan konsentrasi prekursor), serta metode karakterisasi partikel nano (misalnya, spektroskopi UV-Vis, TEM, dan XRD). Evaluasi ini membantu dalam menilai validitas, efisiensi, dan keberlanjutan pendekatan yang diterapkan. (3) Identifikasi Tren dan Inovasi: Tren penelitian terbaru dalam interaksi tanaman dan partikel nano diidentifikasi untuk mengevaluasi kemajuan teknologi. Hal ini termasuk inovasi baru seperti penerapan kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin untuk merancang partikel nano yang lebih stabil dan efisien. Teknik simulasi komputer juga dikaji untuk memahami interaksi molekuler antara partikel nano dan komponen biologis dalam berbagai aplikasi lingkungan dan agronomi.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Teknik Sintesis Partikel Nano berbasis Tumbuhan yang Ramah Lingkungan

Sintesis partikel nano berbasis tumbuhan (*phytosynthesis*) telah diakui sebagai pendekatan inovatif dan ramah lingkungan dalam produksi partikel nano. Metode ini memanfaatkan kemampuan alami tanaman dalam menghasilkan metabolit bioaktif, seperti flavonoid, alkaloid, tanin, dan fenol, untuk mereduksi ion logam menjadi partikel nano. Dengan mengadopsi prinsip kimia hijau, proses *phytosynthesis* menggantikan bahan kimia beracun yang biasanya digunakan pada teknik tradisional, sehingga meminimalkan limbah berbahaya dan risiko terhadap lingkungan.

Tabel 1. Fitosintesis partikel nano dan potensi aplikasinya di berbagai bidang

No.	NPs	Tanaman (Bagian Tanaman)	Penerapan	Pustaka
1	Au	<i>Saraca indica</i> (kulit)	Reduksi katalitik 4-nitrofenol	[1]
2	Au	<i>Cassia fistula</i> (tangkai)	Pengobatan Diabetes Melitus	[2]
3	Au	<i>Terminalia arjuna</i> (buah)	Aktivitas antibakteri dan peningkatan aktivitas perkecambahan biji di <i>Gloriosa superba</i>	[3]
4	Au	<i>Sesbania drummondii</i> (akar dan tunas)	Aplikasi katalitik	[4]
5	Au	<i>Nelumbo nucifera</i> (ekstrak daun)	Larvisida untuk malaria dan filariasis	[5]
6	Au	<i>Cassia fistula</i> (bunga)	Aktivitas antikanker	[6]
7	Au	<i>Tinospora cordifolia</i> (daun)	Pediculocidal dan larvasida	[7]
8	Au, Ag	<i>Acalypha indica</i> (ekstrak daun)	Aktivitas antimikroba	[8]
9	Au, Ag	<i>Lycopersicon esculentum</i> (kalus)	Aktivitas antimikroba	[9]
10	FeO	<i>Rumex acetosa</i> (ekstrak daun)	Katalis Fenton	[10]

Keterangan: [1] Dash *et al.* (2014); [2] Daisy & Saipriya (2012); [3] Gopinath *et al.* (2014); [4] Sharma *et al.* (2007); [5] Santhoshkumar *et al.* (2011); [6] Remya *et al.* (2015); [7] Jayaseelan *et al.* (2011); [8] Krishnaraj *et al.* (2010); [9] Asmathunisha & Kathiresan, (2013); [10] Makarov *et al.* (2014)

Sumber: Rai *et al.* (2018)

Menurut Niculescu *et al.* (2022), keunggulan utama metode ini adalah kesederhanaannya, biaya yang relatif rendah, serta kemampuannya menghasilkan partikel nano dengan ukuran partikel yang seragam dan stabil. Sebagai contoh, partikel nano perak (AgNPs) yang dihasilkan dari ekstrak daun *Azadirachta indica* menunjukkan sifat antimikroba yang sangat tinggi, menjadikannya bahan yang ideal untuk aplikasi medis, agrikultur, dan pengelolaan lingkungan. Hal ini menegaskan bahwa *phytosynthesis* dapat menghasilkan partikel nano dengan sifat fungsional unggul yang sebanding, atau bahkan lebih baik, daripada metode sintesis kimia.

Tabel 2. Fitoremediasi NPs dan pengaruh interaksi NPs pada pertumbuhan tanaman

No.	NPs	Tanaman	Pemulihan NPs	Pengaruh NP terhadap tanaman	Pustaka
1	Ag	<i>Elodea canadensis</i>	57 (72 jam)	Fitotoksik: penurunan kandungan klorofil dan perubahan warna dari hijau menjadi kuning	[11]
2	Ag	<i>Pistia stratiotes</i>	96 (0.02 mg/l)	Fitotoksik	[12]
3	Ag	<i>Potamogeton crispus</i>	54 (0.2 mg/l) (48 jam) 29.3 µg/g (5 hari)	Fitotoksik: penurunan tingkat beberapa komponen tanaman	[13]
4	Ag	<i>Phragmites australis</i>	-	NP menyebabkan gangguan pada ekosistem dengan mempengaruhi struktur komunitas mikroba	[14]
5	Zn	<i>Riccia fluitans</i>	77%	Perubahan warna daun dan batang, hilangnya bentuk normal tanaman, tekanan turgor rendah dalam jaringan, daun lunak dan menggantung	[15]
6	Mn	<i>Salvinia natans</i>	86%	Perubahan warna daun dan batang, hilangnya bentuk normal tanaman, tekanan turgor rendah dalam jaringan, daun lunak dan menggantung	[15]
7	CuO	<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>	4.1 mg/g (50 mg/l) Paparan untuk 21 d)	Pengurangan biomassa tanaman	[16]
8	ZnO	<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>	36.5 mg/g	secara signifikan mempengaruhi pertumbuhan tanaman	[17]
9	Al ₂ O ₃	<i>Lemma minor</i>	-	NP meningkatkan biomassa tanaman sebesar 65%	[18]
10	CDsQDs	<i>Schoenoplectus tabernaemontani</i>	1.5 mg/g (21 hari)	Pengurangan biomassa tanaman	[16]

Keterangan: [11] Van Koetsem *et al.* (2016); [12] Hanks *et al.* (2015); [13] Xu *et al.* (2010); [14] Fernandes *et al.* (2017); [15] Olkhovych *et al.* (2016); [16] Zhang *et al.* (2014); [17] Zhang *et al.* (2015); [18] Juhel *et al.* (2011)

Sumber: Rai *et al.* (2018)

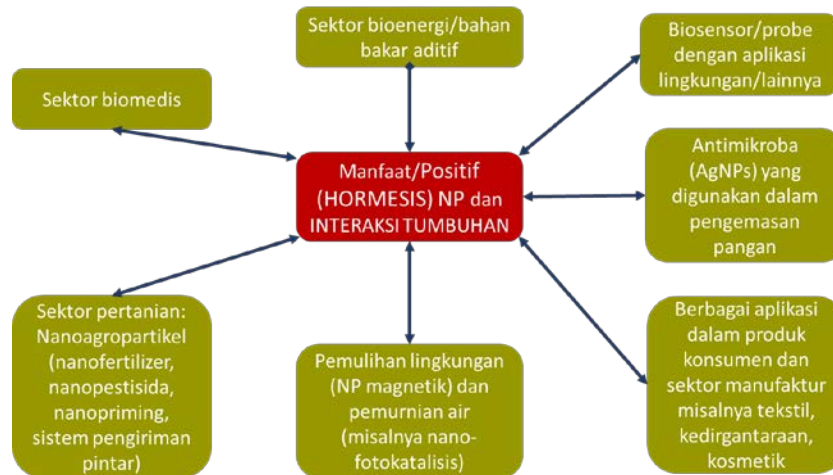
Namun demikian, efektivitas *phytosynthesis* sangat bergantung pada sejumlah parameter proses, termasuk pH, suhu reaksi, konsentrasi ion logam prekursor, dan proporsi ekstrak tanaman yang digunakan. Misalnya, perubahan pH dapat memengaruhi laju reduksi ion logam serta ukuran dan morfologi partikel nano. Selain itu, suhu yang lebih tinggi cenderung mempercepat reaksi tetapi dapat menyebabkan agregasi partikel yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, pengendalian kondisi proses yang presisi sangat diperlukan untuk memperoleh karakteristik partikel nano yang optimal (Harish *et al.*, 2023).

Meski menjanjikan, *phytosynthesis* juga memiliki keterbatasan tertentu. Konsistensi partikel nano yang dihasilkan sering kali terpengaruh oleh variasi alami dalam komposisi metabolit bioaktif pada tanaman. Perbedaan lingkungan tumbuh, usia tanaman, dan metode ekstraksi dapat menyebabkan fluktuasi dalam kualitas dan sifat akhir partikel nano. Sebagai akibatnya, menurut Chen & Grossmann (2017), diperlukan upaya lebih untuk mengoptimalkan metode sintesis melalui standarisasi bahan baku tanaman dan parameter proses.

Di masa depan, penelitian lebih lanjut harus diarahkan pada eksplorasi kombinasi *phytosynthesis* dengan teknik modern, seperti aplikasi ultrasonikasi atau pemrosesan berbasis plasma, untuk meningkatkan efisiensi dan reproduktifitas. Selain itu, integrasi pendekatan berbasis data, seperti simulasi molekuler dan pembelajaran mesin, dapat digunakan untuk memodelkan interaksi antara metabolit tanaman dan ion logam, sehingga menghasilkan desain partikel nano yang lebih terarah dan aplikatif. *Phytosynthesis* memiliki potensi besar untuk menjadi komponen inti dalam produksi material nano yang berkelanjutan dan aman bagi ekosistem (Paragas, 2024).

B. Aplikasi Teknologi Nano dalam Fitoremediasi, Bioenergi, dan Pertanian

Seiring dengan kemajuan pesat dalam ilmu material dan teknologi, teknologi nano telah menunjukkan potensinya untuk membawa dampak besar pada berbagai sektor, termasuk dalam fitoremediasi, bioenergi, dan pertanian. Partikel nano, dengan karakteristik uniknya seperti luas permukaan yang besar, reaktivitas yang tinggi, dan kemampuan untuk berinteraksi dengan berbagai substansi pada skala nanometer, membuka jalan bagi inovasi yang ramah lingkungan serta solusi efisien dalam mengatasi tantangan global di bidang lingkungan dan ketahanan pangan. Pada kajian ini, berbagai aplikasi teknologi nano dalam ketiga bidang tersebut, yang menunjukkan bagaimana teknologi nano dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan dalam berbagai proses.



Gambar 2. Interaksi tanaman dan partikel nano serta aplikasi yang dihasilkan dalam berbagai sektor energi, lingkungan, dan pertanian

B.1. Fitoremediasi

Fitoremediasi merupakan teknik berbasis tumbuhan yang digunakan untuk membersihkan lingkungan dari kontaminan seperti logam berat, senyawa organik, dan polutan lainnya. Penggunaan partikel nano dalam proses ini memperluas potensi fitoremediasi dengan meningkatkan kapasitas tanaman untuk menangkap, mengakumulasi, dan mendetoksifikasi polutan. Tanaman hiperakumulator, seperti *Brassica juncea*, diketahui memiliki kemampuan luar biasa untuk menyerap logam berat seperti Pb, Cd, dan Ag dari tanah yang tercemar. Melalui proses biologis yang kompleks, logam ini kemudian dikonversi menjadi partikel nano dalam jaringan tanaman, menjadikannya sebagai pendekatan ganda untuk pemulihan lingkungan sekaligus produksi material bernilai tinggi (Noman *et al.*, 2023).

Pendekatan berbasis partikel nano menawarkan keuntungan strategis dalam efisiensi remedi dibandingkan metode tradisional. Partikel nano mempercepat degradasi atau transformasi polutan melalui mekanisme seperti katalisis atau adsorpsi (Abbas *et al.*, 2020). Misalnya, partikel nano perak yang dihasilkan oleh tanaman tidak hanya membersihkan tanah yang tercemar, tetapi juga dapat diekstraksi untuk aplikasi medis dan industri lain. Proses ini meningkatkan nilai ekonomis fitoremediasi sekaligus mendukung pendekatan sirkularitas dalam pengelolaan limbah.

Dalam pengelolaan limbah air, partikel nano memberikan solusi tambahan melalui reaksi fotokatalitik dan adsorpsi yang sangat efisien. Partikel nano TiO₂, misalnya, digunakan secara luas untuk mendegradasi senyawa organik toksik dalam air limbah. Melalui eksitasi sinar UV, partikel nano TiO₂ memicu reaksi fotokatalitik yang menghasilkan radikal bebas, yang mampu memecah molekul organik beracun menjadi senyawa yang lebih sederhana dan tidak berbahaya.

(Kumar *et al.*, 2022). Pendekatan ini menawarkan solusi hemat energi sekaligus mengurangi beban polutan pada sumber daya air (Syska, 2022).

Namun demikian, tantangan tetap ada dalam penerapan fitoremediasi berbasis partikel nano. Salah satu isu utama adalah akumulasi partikel di lingkungan, yang dapat mengganggu keseimbangan mikroorganisme tanah atau organisme akuatik. Selain itu, proses pengelolaan biomassa yang terkontaminasi partikel nano membutuhkan perhatian khusus untuk mencegah pencemaran sekunder (Brar *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diperlukan pengembangan protokol yang lebih baik untuk memastikan bahwa proses ini dapat dilakukan secara aman dan efisien.

Di masa depan, integrasi fitoremediasi dengan teknologi berbasis data, seperti simulasi molekuler dan pembelajaran mesin, dapat digunakan untuk memprediksi interaksi molekuler antara tanaman, partikel nano, dan kontaminan. Hal ini akan memungkinkan pengoptimalan spesifik untuk berbagai jenis polutan dan kondisi lingkungan. Dengan potensi besar untuk mendukung keberlanjutan ekosistem, pendekatan berbasis partikel nano memiliki peluang untuk mengubah paradigma pengelolaan lingkungan di era modern ini.

B.2. Bioenergi

Partikel nano telah menunjukkan potensi besar dalam mendukung pengembangan energi terbarukan, khususnya dalam produksi bioenergi yang berkelanjutan. Beberapa tanaman seperti *Eichhornia crassipes* (eceng gondok) dan *Jatropha curcas* tidak hanya digunakan sebagai sumber biomassa, tetapi juga diketahui mampu menghasilkan biomassa yang diperkaya partikel nano melalui fitoremediasi alami. Biomassa ini dapat dimanfaatkan untuk produksi bioetanol, biogas, dan bahan bakar hidrogen, sekaligus mendukung target global untuk mengurangi emisi karbon (Ropiudin & Syska, 2023). Proses ini mengintegrasikan remedi lingkungan dan bioenergi, menciptakan solusi ganda untuk masalah polusi dan kebutuhan energi.

Pemanfaatan biomassa yang mengandung partikel nano memberikan nilai tambah karena peningkatan efisiensi energi yang signifikan. Dalam produksi bioetanol, misalnya, biomassa lignoselulosa yang sulit dipecah secara konvensional dapat didegradasi lebih cepat dengan bantuan katalis berbasis partikel nano. Katalis ini mempercepat konversi lignin dan selulosa menjadi gula sederhana, yang kemudian difermentasi menjadi bioetanol (Syska & Ropiudin, 2023). Dengan cara ini, penggunaan partikel nano tidak hanya mempercepat proses, tetapi juga meningkatkan rendemen bioetanol, sehingga lebih ekonomis dan efisien.

Selain bioetanol, teknologi partikel nano juga diterapkan dalam produksi biogas. Penambahan partikel nano oksida logam seperti ZnO dan TiO₂ pada proses digestasi anaerobik telah terbukti meningkatkan produksi metana. Partikel nano ini mempercepat dekomposisi bahan organik kompleks dan mendukung aktivitas mikroorganisme yang bertanggung jawab atas pembentukan metana. Hasilnya, efisiensi proses digestasi meningkat, memungkinkan lebih banyak energi dihasilkan dari jumlah biomassa yang sama (Kumar *et al.*, 2022).

Dalam pengembangan bahan bakar hidrogen, partikel nano berfungsi sebagai katalis dalam proses pemisahan air atau reformasi metana. Misalnya, partikel nano berbasis logam mulia seperti Pt dan Au digunakan untuk meningkatkan efisiensi elektrolisis, yang menghasilkan hidrogen dengan tingkat kemurnian tinggi. Teknologi ini dapat diintegrasikan dengan biomassa terbarukan, seperti limbah agrikultur yang mengandung partikel nano alami, untuk memproduksi bahan bakar yang ramah lingkungan (Sharma *et al.*, 2022).

Namun demikian, beberapa tantangan perlu diatasi untuk mengintegrasikan partikel nano dalam sistem bioenergi secara luas. Isu utama meliputi potensi toksisitas partikel nano dalam limbah proses dan perlunya metode yang efektif untuk pemulihan atau daur ulang partikel nano dari residu biomassa. Di masa depan, pendekatan berbasis data, seperti simulasi reaksi kimia pada

level molekuler, dapat digunakan untuk merancang katalis partikel nano yang lebih efisien dan aman bagi lingkungan. Dengan inovasi berkelanjutan, teknologi ini berpotensi menjadi elemen kunci dalam transisi energi global yang lebih hijau dan berkelanjutan.

B.3. Pertanian

Partikel nano telah membawa inovasi signifikan dalam sektor agronomi, terutama melalui pengembangan pupuk-nano dan pestisida-nano yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya serta melindungi tanaman dari patogen. Pupuk-nano, yang mengandung partikel berukuran nanometer, memungkinkan penyediaan nutrisi yang lebih presisi kepada tanaman, sementara pestisida-nano menawarkan solusi yang lebih efektif dalam mengendalikan hama tanpa membahayakan lingkungan. Misalnya, partikel nano ZnO dan CuO dilaporkan dapat meningkatkan kemampuan fotosintesis tanaman sekaligus memperkuat ketahanan alami mereka terhadap serangan mikroorganisme patogen (Hofmann *et al.*, 2020).

Penggunaan partikel nano berbasis karbon, seperti karbon *nanotube* (CNTs), memberikan manfaat tambahan dengan mempercepat pertumbuhan akar dan meningkatkan penyerapan air oleh tanaman. CNTs juga membantu memperbaiki struktur tanah, yang secara tidak langsung mendukung pertumbuhan tanaman yang lebih sehat dan produktif. Selain itu, sifat antimikroba partikel nano logam memberikan perlindungan ekstra terhadap infeksi patogen, yang sering menjadi salah satu penyebab utama kerugian dalam sektor pertanian (Singh *et al.*, 2021).

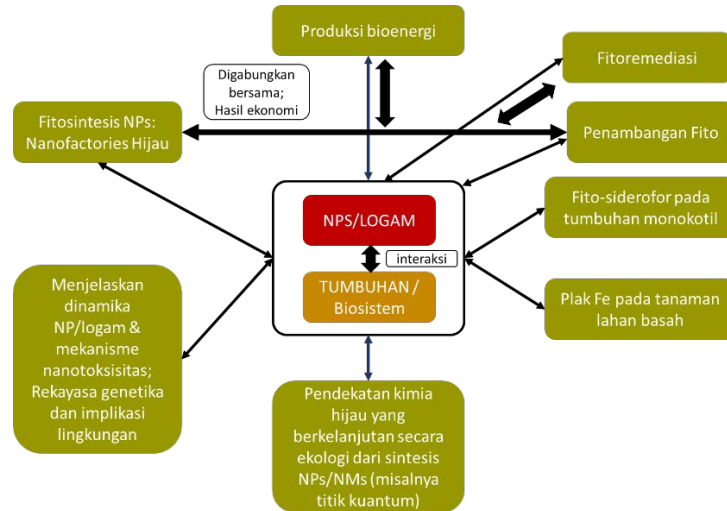
Namun demikian, aplikasi partikel nano dalam pertanian memerlukan pendekatan hati-hati karena adanya potensi toksisitas terhadap ekosistem. Partikel nano yang terakumulasi di tanah dapat memengaruhi aktivitas mikroorganisme yang berperan penting dalam siklus nutrisi, seperti dekomposisi bahan organik dan fiksasi nitrogen. Ketidakseimbangan mikroba tanah ini dapat berdampak negatif pada kesuburan tanah dalam jangka panjang (Yadav *et al.*, 2023).

Selain itu, keberadaan partikel nano di lingkungan agrikultur dapat menyebabkan bioakumulasi dalam rantai makanan. Tanaman yang menyerap partikel nano dari tanah dapat menyalurkannya ke konsumen manusia atau hewan, yang pada tingkat tertentu berpotensi membawa dampak toksik. Oleh karena itu, penting untuk memastikan bahwa partikel nano yang digunakan aman bagi lingkungan dan manusia dengan mengatur dosis serta metode aplikasinya secara tepat.

Di masa depan, pengembangan partikel nano untuk pertanian harus mempertimbangkan keberlanjutan dan keamanan lingkungan. Teknologi berbasis data, seperti simulasi molekuler dan pembelajaran mesin, dapat digunakan untuk merancang partikel nano dengan sifat khusus yang meminimalkan toksisitas sambil tetap memberikan manfaat agronomis yang optimal. Dengan inovasi yang berkelanjutan, teknologi nano berpotensi menjadi pilar utama dalam mewujudkan pertanian modern yang produktif, efisien, dan ramah lingkungan.

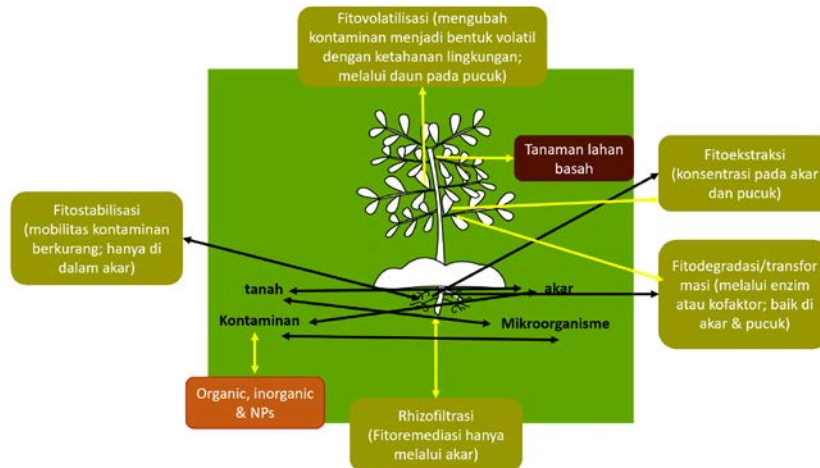
C. Evaluasi Tantangan Utama dalam Penggunaan Teknologi Nano

Meskipun partikel nano menawarkan berbagai manfaat dalam pengembangan bioenergi dan teknologi lainnya, terdapat beberapa tantangan utama yang perlu diperhatikan terkait dengan penggunaannya. Salah satu tantangan terbesar adalah masalah toksisitas dan akumulasi partikel nano di lingkungan. Ketika partikel nano terlepas ke alam, mereka dapat menimbulkan risiko toksik baik secara langsung pada organisme akuatik maupun melalui proses bioakumulasi yang berpotensi menular pada rantai makanan. Sebagai contoh, partikel nano perak (AgNPs) yang digunakan dalam berbagai aplikasi industri dapat terkumpul pada tanaman pangan dan mengurangi kualitas nutrisinya, serta meningkatkan risiko kesehatan bagi manusia yang mengkonsumsi tanaman tersebut. Hal ini menjadi perhatian serius dalam rangka memastikan bahwa manfaat dari penggunaan teknologi nano tidak datang dengan dampak negatif yang dapat merusak lingkungan dan kesehatan manusia (Rai *et al.*, 2018).



Gambar 3. Interaksi tanaman dan partikel nano/kontaminan mengubah berbagai isu terkait bioenergi, lingkungan, keberlanjutan, dinamika/mekanisme polusi, dan kimia hijau (Rai *et al.*, 2018 – diolah lebih lanjut)

Selain itu, dampak partikel nano terhadap ekosistem mikroba juga merupakan isu penting. Tanah, yang menjadi habitat bagi berbagai komunitas mikroba, memiliki peran krusial dalam mendukung kesuburan dan kesehatan ekosistem agronomi. Studi menunjukkan bahwa keberadaan partikel nano dalam tanah dapat mengganggu keseimbangan komunitas mikroba, yang pada gilirannya memengaruhi berbagai fungsi tanah, seperti dekomposisi bahan organik dan siklus nitrogen. Mikrobiota tanah yang terdistorsi akibat paparan partikel nano dapat mengurangi kesuburan tanah dan merusak proses-proses vital dalam sistem pertanian, yang berpotensi mengganggu produksi pangan secara lebih luas. Oleh karena itu, penting untuk mengembangkan teknologi yang dapat memitigasi efek samping ini, sehingga penggunaan partikel nano tetap dapat berjalan dengan bijaksana dan bertanggung jawab bagi lingkungan (Abbas *et al.*, 2020).



Gambar 4. Berbagai langkah yang terlibat dalam fitoremediasi kontaminan baru (anorganik, organik/partikel nano) melalui biomassa akar dan tajuk tanaman di ekosistem lahan basah (Rai *et al.*, 2018 – diolah lebih lanjut)

D. Strategi Integrasi Teknologi Nano dengan Pendekatan Berbasis Data

D.1. Penerapan Kecerdasan Buatan (AI) dan Pembelajaran Mesin (ML)

Pendekatan berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence* - AI) dan pembelajaran mesin (*Machine Learning* - ML) telah membuka peluang revolusioner dalam pengembangan dan optimasi partikel nano. Teknologi ini memungkinkan pengolahan data yang kompleks dan pengambilan keputusan berbasis algoritma untuk meningkatkan efisiensi proses sintesis. Salah satu aplikasi utama AI dalam sintesis partikel nano adalah optimalisasi parameter reaksi, seperti rasio antara ekstrak tumbuhan dan larutan prekursor, suhu, serta pH. Dengan simulasi berbasis data, parameter ini dapat diatur secara presisi untuk menghasilkan partikel nano yang stabil, seragam, dan memiliki sifat fungsional tertentu.

AI tidak hanya mengoptimalkan sintesis tetapi juga memfasilitasi desain partikel nano yang lebih spesifik untuk berbagai aplikasi (Jiang *et al.*, 2022). Misalnya, algoritma jaringan saraf tiruan (*Artificial Neural Networks*, ANN) dapat digunakan untuk memodelkan interaksi antara partikel nano dengan molekul target, seperti logam berat dalam aplikasi fitoremediasi. ANN mampu mensimulasikan mekanisme adsorpsi logam pada permukaan partikel nano, memungkinkan prediksi yang lebih akurat tentang efisiensi penghilangan polutan dalam kondisi tertentu. Hal ini mempercepat pengembangan material baru tanpa memerlukan eksperimen laboratorium yang intensif waktu dan biaya.

Selain itu, AI dapat digunakan untuk memprediksi dampak lingkungan dari aplikasi partikel nano. Algoritma pembelajaran mesin, seperti Random Forest dan Support Vector Machines, mampu menganalisis data toksisitas untuk memprediksi risiko potensial dari paparan partikel nano terhadap organisme non-target di lingkungan air atau tanah. Informasi ini membantu memastikan bahwa desain partikel nano tidak hanya berfokus pada kinerja, tetapi juga pada keamanan ekosistem secara keseluruhan.

Aplikasi AI dalam simulasi molekuler juga memegang peran penting dalam desain partikel nano (Gao *et al.*, 2024). Dengan menggunakan simulasi berbasis dinamika molekuler, AI dapat mengevaluasi stabilitas partikel nano dalam matriks lingkungan yang berbeda, seperti cairan tanah atau sistem perairan. Hal ini memungkinkan penciptaan desain yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik aplikasi, seperti peningkatan daya serap nutrisi pada tanaman atau efisiensi fotokatalitik dalam pemurnian air.

Meskipun potensinya besar, penerapan AI dan ML dalam teknologi nano menghadapi beberapa tantangan. Salah satunya adalah ketersediaan data berkualitas tinggi untuk pelatihan algoritma, terutama dalam domain yang baru berkembang seperti *photosynthesis* dan aplikasinya. Oleh karena itu, dibutuhkan kerjasama antara laboratorium penelitian, pakar data, dan pengembang teknologi untuk memastikan model yang akurat dan relevan. Dengan mengintegrasikan teknologi AI ke dalam siklus pengembangan partikel nano, masa depan teknologi nano dapat diarahkan menuju solusi yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan.

D.2. Integrasi Desain Berbasis Molekul dengan Simulasi Komputer

Simulasi molekuler telah menjadi alat penting dalam memahami interaksi kompleks antara partikel nano dan struktur biologis, seperti membran sel, protein, atau enzim (Okoampah *et al.*, 2020). Model ini memungkinkan analisis detail hingga ke tingkat atom, mengungkap mekanisme interaksi yang mendasari proses biokimia, seperti adsorpsi nutrisi, aktivitas katalitik, atau pelepasan zat aktif. Sebagai contoh, simulasi molekuler dapat digunakan untuk mengidentifikasi cara partikel nano berikatan dengan enzim kunci dalam metabolisme tanaman, yang pada gilirannya membuka peluang untuk menciptakan formulasi pupuk-nano yang lebih efisien dan efektif.

Integrasi simulasi molekuler dalam desain partikel nano tidak hanya mempercepat inovasi tetapi juga meningkatkan akurasi dalam pengembangan material nano. Dengan menggunakan

pendekatan berbasis komputer, para peneliti dapat memprediksi stabilitas dan reaktivitas partikel nano di lingkungan yang kompleks, seperti tanah pertanian atau air limbah (Moulahoum & Ghorbanizamani, 2024). Teknologi ini mempermudah pengujian berbagai kombinasi desain tanpa perlu melakukan eksperimen laboratorium yang ekstensif, sehingga menghemat waktu dan sumber daya. Salah satu contohnya adalah aplikasi simulasi dalam mendesain partikel nano untuk biofermentasi, di mana partikel nano difokuskan untuk meningkatkan efisiensi pemecahan biomassa lignoselulosa menjadi bahan bakar bioetanol.

Lebih jauh lagi, simulasi molekuler membuka peluang untuk personalisasi partikel nano berdasarkan kebutuhan spesifik aplikasi. Desain berbasis data ini memungkinkan pembuatan partikel nano yang tidak hanya memiliki sifat fungsional unggul tetapi juga memastikan keamanan lingkungan. Misalnya, dengan menganalisis jalur metabolisme dan interaksi dalam jaringan tanaman, simulasi dapat memandu pengembangan partikel nano yang meminimalkan bioakumulasi toksik tanpa mengurangi efisiensi agronomis. Dengan potensi ini, integrasi simulasi molekuler menjadi landasan untuk menciptakan solusi teknologi nano yang presisi, efektif, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Ulasan kritis ini telah berhasil menjawab empat tujuan khusus terkait penerapan nanoteknologi dalam lingkungan, energi, dan pertanian. Berikut kesimpulan berdasarkan analisis mendalam yang telah dilakukan: (1) Teknik *phytosynthesis*, yang memanfaatkan metabolit bioaktif tanaman seperti flavonoid, tanin, dan fenol, telah diidentifikasi sebagai metode ramah lingkungan dalam produksi nanopartikel. Teknik ini tidak hanya menggantikan bahan kimia toksik pada proses tradisional, tetapi juga menghasilkan nanopartikel yang stabil dengan ukuran partikel seragam. Namun demikian, teknik ini memerlukan optimasi lebih lanjut, terutama dalam standarisasi parameter proses untuk mengatasi variabilitas alami pada bahan tumbuhan yang digunakan. (2) Nanoteknologi memberikan kontribusi besar dalam fitoremediasi, bioenergi, dan pertanian. Dalam fitoremediasi, tanaman hiperakumulator digunakan untuk menyerap polutan dan mengonversinya menjadi nanopartikel, seperti TiO₂, yang efektif dalam mendegradasi senyawa organik toksik melalui proses fotokatalitik. Di sektor bioenergi, nanopartikel berfungsi sebagai katalis yang mempercepat konversi lignoselulosa menjadi bioetanol dan meningkatkan produksi metana dalam digestasi anaerobik. Sementara itu, dalam pertanian, nano-pupuk dan nanopestisida berbasis ZnO dan CuO meningkatkan efisiensi nutrisi serta ketahanan tanaman terhadap patogen, dengan karbon nanotube (CNTs) yang memperbaiki penyerapan air dan struktur tanah, memberikan solusi inovatif untuk agrikultur modern. (3) Meskipun manfaatnya besar, tantangan utama dalam penerapan nanopartikel adalah potensi toksisitasnya terhadap ekosistem. Akumulasi nanopartikel di tanah dapat mengganggu mikroba penting yang memengaruhi siklus nutrisi, sementara bioakumulasi dalam rantai makanan menimbulkan risiko kesehatan pada manusia dan hewan. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan protokol pengelolaan limbah nanopartikel serta kajian lebih lanjut mengenai dampak jangka panjang penggunaannya. (4) Penerapan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) memberikan solusi strategis untuk mendesain dan mengoptimalkan nanopartikel. Teknologi ini memungkinkan prediksi stabilitas dan efisiensi nanopartikel berdasarkan simulasi molekuler. Selain itu, desain berbasis data membantu menciptakan nanopartikel dengan toksisitas minimum yang sesuai untuk aplikasi tertentu. Pendekatan ini menunjukkan potensi besar dalam mempercepat inovasi sambil memastikan keamanan dan keberlanjutan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbas, Q., Yousaf, B., Ali, M.U., Munir, M.A.M., El-Naggar, A., Rinklebe, J., & Naushad, M. 2020. Transformation pathways and fate of engineered nanoparticles (ENPs) in distinct interactive environmental compartments: A review. *Environment international*, 138, p.105646.
- Anand, U., Carpena, M., Kowalska-Górska, M., Garcia-Perez, P., Sunita, K., Bontempi, E., Dey, A., Prieto, M.A., Proćków, J., & Simal-Gandara, J. 2022. Safer plant-based nanoparticles for combating antibiotic resistance in bacteria: A comprehensive review on its potential applications, recent advances, and future perspective. *Science of The Total Environment*, 821, p.153472.
- Asmathunisha, N. & Kathiresan, K. 2013. Rapid biosynthesis of antimicrobial silver and gold nanoparticles by in vitro callus and leaf extracts from *Lycopersicon esculentum* Mill. *Int. J. Pharm. Bio Sci.* 4, 334–344.]
- Brar, K.K., Magdouli, S., Othmani, A., Ghanei, J., Narisetty, V., Sindhu, R., Binod, P., Pugazhendhi, A., Awasthi, M.K., & Pandey, A. 2022. Green route for recycling of low-cost waste resources for the biosynthesis of nanoparticles (NPs) and nanomaterials (NMs)- A review. *Environmental Research*, 207, p.112202.
- Chen, Q. & Grossmann, I.E. 2017. Recent developments and challenges in optimization-based process synthesis. *Annual review of chemical and biomolecular engineering*, 8(1), pp.249-283.
- Daisy, P. & Saipriya, K. 2012. Biochemical analysis of *Cassia fistula* aqueous extract and phytochemically synthesized gold nanoparticles as hypoglycemic treatment for diabetes mellitus. *International journal of nanomedicine*, pp.1189-1202.
- Dash, S.S., Majumdar, R., Sikder, A.K., Bag, B.G., & Patra, B.K. 2014. *Saraca indica* bark extract mediated green synthesis of polyshaped gold nanoparticles and its application in catalytic reduction. *Applied Nanoscience*, 4, pp.485-490.
- Fernandes, J.P., Mucha, A.P., Francisco, T., Gomes, C.R., & Almeida, C.M.R. 2017. Silver nanoparticles uptake by salt marsh plants–Implications for phytoremediation processes and effects in microbial community dynamics. *Marine pollution bulletin*, 119(1), pp.176-183.
- Gao, X.J., Ciura, K., Ma, Y., Mikolajczyk, A., Jagiello, K., Wan, Y., Gao, Y., Zheng, J., Zhong, S., Puzyn, T., & Gao, X. 2024. Toward the Integration of Machine Learning and Molecular Modeling for Designing Drug Delivery Nanocarriers. *Advanced Materials*, 36(45), p.2407793.
- Gopinath, K., Gowri, S., Karthika, V., & Arumugam, A. 2014. Green synthesis of gold nanoparticles from fruit extract of *Terminalia arjuna*, for the enhanced seed germination activity of *Gloriosa superba*. *Journal of Nanostructure in Chemistry*, 4, pp.1-11.
- Hanks, N.A., Caruso, J.A., & Zhang, P. 2015. Assessing *Pistia stratiotes* for phytoremediation of silver nanoparticles and Ag (I) contaminated waters. *Journal of Environmental Management*, 164, pp.41-45.
- Harish, V., Ansari, M.M., Tewari, D., Yadav, A.B., Sharma, N., Bawarig, S., García-Betancourt, M.L., Karatutlu, A., Bechelany, M., & Barhoum, A. 2023. Cutting-edge advances in tailoring size, shape, and functionality of nanoparticles and nanostructures: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 149, p.105010.
- Hofmann, T., Lowry, G.V., Ghoshal, S., Tufenkji, N., Brambilla, D., Dutcher, J.R., Gilbertson, L.M., Giraldo, J.P., Kinsella, J.M., Landry, M.P., & Lovell, W. 2020. Technology readiness and overcoming barriers to sustainably implement nanotechnology-enabled plant agriculture. *Nature Food*, 1(7), pp.416-425.
- Infante-Neta, A.A., D’Almeida, A.P., & Albuquerque, T.L.D. 2024. Bacterial Cellulose in Food Packaging: A Bibliometric Analysis and Review of Sustainable Innovations and Prospects. *Processes*, 12(9), p.1975.

- Jayaseelan, C., Rahuman, A.A., Rajakumar, G., Vishnu Kirthi, A., Santhoshkumar, T., Marimuthu, S., Bagavan, A., Kamaraj, C., Zahir, A.A., & Elango, G. 2011. Synthesis of pediculocidal and larvicidal silver nanoparticles by leaf extract from heartleaf moonseed plant, *Tinospora cordifolia* Miers. *Parasitology research*, 109, pp.185-194.
- Jiang, Y., Salley, D., Sharma, A., Keenan, G., Mullin, M., & Cronin, L. 2022. An artificial intelligence enabled chemical synthesis robot for exploration and optimization of nanomaterials. *Science Advances*, 8(40), p.eabo2626.
- Juhel, G., Batisse, E., Hugues, Q., Daly, D., van Pelt, F.N., O'Halloran, J., & Jansen, M.A. 2011. Alumina nanoparticles enhance growth of *Lemna minor*. *Aquatic toxicology*, 105(3-4), pp.328-336.
- Khan, Y., Sadia, H., Ali Shah, S.Z., Khan, M.N., Shah, A.A., Ullah, N., Ullah, M.F., Bibi, H., Bafakeeh, O.T., Khedher, N.B., & Eldin, S.M. 2022. Classification, synthetic, and characterization approaches to nanoparticles, and their applications in various fields of nanotechnology: A review. *Catalysts*, 12(11), p.1386.
- Krishnaraj, C., Jagan, E.G., Rajasekar, S., Selvakumar, P., Kalaichelvan, P.T., & Mohan, N.J.C.S.B.B. 2010. Synthesis of silver nanoparticles using *Acalypha indica* leaf extracts and its antibacterial activity against water borne pathogens. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 76(1), pp.50-56.
- Kumar, A., Choudhary, P., Kumar, A., Camargo, P.H., & Krishnan, V. 2022. Recent advances in plasmonic photocatalysis based on TiO₂ and noble metal nanoparticles for energy conversion, environmental remediation, and organic synthesis. *Small*, 18(1), p.2101638.
- Makarov, V.V., Makarova, S.S., Love, A.J., Sinitsyna, O.V., Dudnik, A.O., Yaminsky, I.V., Taliansky, M.E., & Kalinina, N.O. 2014. Biosynthesis of stable iron oxide nanoparticles in aqueous extracts of *Hordeum vulgare* and *Rumex acetosa* plants. *Langmuir*, 30(20), pp.5982-5988.
- Mandal, R.R., Bashir, Z., Mandal, J.R., & Raj, D. 2024. Potential strategies for phytoremediation of heavy metals from wastewater with circular bioeconomy approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(6), p.502.
- Matešić, M., Varlec, D., & Renić, N. 2023. The Role of Green Technologies in the Transformation Process Towards Climate Neutrality: the Perspective of COP28. 14. *konferencije o održivom razvoju*, p.32.
- Moulahoum, H. & Ghorbanizamani, F. 2024. Navigating the development of silver nanoparticles based food analysis through the power of artificial intelligence. *Food Chemistry*, p.138800.
- Niculescu, A.G., Chircov, C., & Grumezescu, A.M. 2022. Magnetite nanoparticles: Synthesis methods—A comparative review. *Methods*, 199, pp.16-27.
- Noman, E.A., Al-Gheethi, A., Al-Sahari, M., Mohamed, R.M.S.R., Crane, R., Ab Aziz, N.A., & Govarthan, M. 2022. Challenges and opportunities in the application of bioinspired engineered nanomaterials for the recovery of metal ions from mining industry wastewater. *Chemosphere*, 308, p.136165.
- Okoampah, E., Mao, Y., Yang, S., Sun, S., & Zhou, C. 2020. Gold nanoparticles–biomembrane interactions: From fundamental to simulation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 196, p.111312.
- Olkhovych, O., Svietlova, N., Konotop, Y., Karaushu, O., & Hrechishkina, S. 2016. Removal of metal nanoparticles colloidal solutions by water plants. *Nanoscale Research Letters*, 11, pp.1-7.
- Paragas, D.S. 2024. Nanoinsecticide Perspectives for Plant Protection and Nutrition: An Emerging Field. In *Nano-Insecticide: Today and Future Perspectives* (pp. 51-75). Cham: Springer Nature Switzerland.
- Punniyakotti, P., Vinayagam, S., Rajamohan, R., Priya, S.D., Moovendhan, M., & Sundaram, T. 2024. Environmental Fate and Ecotoxicological Behaviour of Pesticides and Insecticides in Non-Target Environments: Nanotechnology-Based Mitigation Strategies. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, p.113349.

- Rai, P.K., Kumar, V., Lee, S., Raza, N., Kim, K.H., Ok, Y.S., & Tsang, D.C. 2018. Nanoparticle-plant interaction: Implications in energy, environment, and agriculture. *Environment international*, 119, pp.1-19.
- Remya, R.R., Rajasree, S.R., Aranganathan, L., & Suman, T.Y. 2015. An investigation on cytotoxic effect of bioactive AgNPs synthesized using Cassia fistula flower extract on breast cancer cell MCF-7. *Biotechnology Reports*, 8, pp.110-115.
- Ropiudin, R. & Syska, K., 2023. Analisis Kualitas Biobriket Karbonisasi Limbah Bambu Dengan Perekat Tepung Singkong dan Tepung Nasi Aking. *Jurnal Agritechno*, pp.1-12.
- Santhoshkumar, T., Rahuman, A.A., Rajakumar, G., Marimuthu, S., Bagavan, A., Jayaseelan, C., Zahir, A.A., Elango, G., & Kamaraj, C. 2011. Synthesis of silver nanoparticles using Nelumbo nucifera leaf extract and its larvicidal activity against malaria and filariasis vectors. *Parasitology research*, 108, pp.693-702.
- Shafey, A.M.E. 2020. Green synthesis of metal and metal oxide nanoparticles from plant leaf extracts and their applications: A review. *Green Processing and Synthesis*, 9(1), pp.304-339.
- Sharma, N.C., Sahi, S.V., Nath, S., Parsons, J.G., Gardea-Torresde, J.L., & Pal, T. 2007. Synthesis of plant-mediated gold nanoparticles and catalytic role of biomatrix-embedded nanomaterials. *Environmental science & technology*, 41(14), pp.5137-5142.
- Sharma, P., Bano, A., Singh, S.P., Atkinson, J.D., Lam, S.S., Iqbal, H.M., & Tong, Y.W. 2022. Nanomaterials as highly efficient photocatalysts used for bioenergy and biohydrogen production from waste toward a sustainable environment. *Fuel*, 329, p.125408.
- Singh, R.P., Handa, R., & Manchanda, G. 2021. Nanoparticles in sustainable agriculture: An emerging opportunity. *Journal of controlled release*, 329, pp.1234-1248.
- Syska, K. & Ropiudin, R. 2023. Study of "Green Manufacturing" on Rural Crystal Coconut Sugar SMEs. *Journal of Tropical Agricultural Engineering and Biosystems-Jurnal Keteknik Pertanian Tropis dan Biosistem*, 11(1), pp.13-27.
- Syska, K. 2022. Peningkatan Daya Saing Melalui Penerapan Pengereng Hemat Energi pada UMKM Gula Kelapa Kristal Sari Manggar, Banyumas Jawa Tengah. *Aptekmas Jurnal Pengabdian pada Masyarakat*, 5(4), pp.164-172.
- Van Koetsem, F., Xiao, Y., Luo, Z., & Du Laing, G. 2016. Impact of water composition on association of Ag and CeO₂ nanoparticles with aquatic macrophyte Elodea canadensis. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, pp.5277-5287.
- Xu, Q.S., Hu, J.Z., Xie, K.B., Yang, H.Y., Du, K.H., & Shi, G.X. 2010. Accumulation and acute toxicity of silver in Potamogeton crispus L. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), pp.186-193.
- Yadav, K.K., Gupta, N., Kumar, A., Reece, L.M., Singh, N., Rezaia, S., & Khan, S.A. 2018. Mechanistic understanding and holistic approach of phytoremediation: A review on application and future prospects. *Ecological engineering*, 120, pp.274-298.
- Yadav, N., Garg, V.K., Chhillar, A.K., & Rana, J.S. 2023. Recent advances in nanotechnology for the improvement of conventional agricultural systems: A review. *Plant Nano Biology*, 4, p.100032.
- Zhang, D., Hua, T., Xiao, F., Chen, C., Gersberg, R.M., Liu, Y., Ng, W.J., & Tan, S.K. 2014. Uptake and accumulation of CuO nanoparticles and CdS/ZnS quantum dot nanoparticles by Schoenoplectus tabernaemontani in hydroponic mesocosms. *Ecological engineering*, 70, pp.114-123.
- Zhang, D., Hua, T., Xiao, F., Chen, C., Gersberg, R.M., Liu, Y., Stuckey, D., Ng, W.J., & Tan, S.K. 2015. Phytotoxicity and bioaccumulation of ZnO nanoparticles in Schoenoplectus tabernaemontani. *Chemosphere*, 120, pp.211-219.
- Zhang, Z., Malik, M.Z., Khan, A., Ali, N., Malik, S., & Bilal, M. 2022. Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability. *Science of The Total Environment*, 807, p.150856.