

Inovasi Nanoagroteknologi untuk Pertanian Berkelanjutan: Mengintegrasikan *Smart Technology* dengan Praktik Ramah Lingkungan

¹Molani Paulina Hasibuan, ²Mutiara Agustina Nst, ³Florentina Maria Panda,
⁴Dwi Agustini

¹Pendidikan Kimia, Universitas Samudra, Langsa, Aceh, Indonesia

²Pendidikan Kimia, Universitas Negeri Medan, Sumatera Utara, Indonesia

³Pendidikan Fisika, Universitas Cenderawasih, Papua, Indonesia

⁴Matematika, Universitas Nahdlatul Wathan, Mataram, NTB, Indonesia

Korespondensi: molanipaulinahsb@unsam.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.70115/ijsta.v2i1.223>

Article Info

Article history:

Received : April 21, 2024

Revised : May 25, 2024

Accepted : June 30, 2024

Keywords:

Nanoagrotechnology; Smart
Technology; Sustainable
Agriculture; Global Climate

ABSTRACT

Global climate change and rapid population growth have created significant challenges to food security. To overcome these challenges, innovative technologies are needed that are capable of increasing agricultural yields in a sustainable manner. This research aims to explore the concept of Nanoagrotechnology as a smart technology that has the potential to increase agricultural productivity and efficiency while maintaining environmental sustainability. Nanoagrotechnology integrates nanotechnology applications in crop production and protection, such as the use of nano-fertilisers, nanopesticides, nanobiosensors, and nano-based technologies for remediation of contaminated soil. This research method uses a literature review approach by analysing various study results related to the application of nanotechnology in the agricultural sector. The results of the analysis show that nanotechnology is able to increase the efficiency of resource use, reduce negative environmental impacts, and produce crops with better quality and quantity. Nanoagrotechnology is thus a potential solution to the challenges of modern agriculture and contributes to global food security.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

@2024 AHS Publisher

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global dan peningkatan populasi yang cepat meningkatkan tantangan bagi ketahanan pangan, dan hal ini menuntut metode perbaikan tanaman yang efisien yang memastikan kualitas dan kuantitas tanaman yang unggul. Perkiraan bahwa populasi dunia akan melonjak secara dramatis menjadikan antisipasi krisis pangan menjadi salah satu masalah yang

paling penting di seluruh dunia. Berdasarkan data Worldometer (2023), populasi dunia pada tahun 2023 adalah 8.045.311.447 jiwa pada pertengahan tahun, dimana meningkat 0,88% dari tahun 2022, dan 0,83% dari tahun 2021. Indonesia termasuk negara lima terbesar jumlah penduduknya dengan laju pertumbuhan penduduk pada tahun 2022 sebesar 1,17% dan diperkirakan akan mencapai 319 jiwa pada tahun 2045.

Karena populasi semakin meningkat baik di tingkat nasional maupun internasional, ketahanan pangan menjadi tantangan unik yang perlu dihadapi saat ini. Sistem agrikultur yang efisien dan sangat konsisten penting untuk mencegah krisis pangan di dunia pada masa yang akan datang. Pencemaran, perubahan iklim, dan peningkatan kebutuhan terhadap energi dan air telah meningkatkan hasil pangan di seluruh dunia dan cara pendistribusiannya (Usman et al., 2020). Namun, cara saat ini sangat bergantung pada pupuk biasa, pemnfaatan pestisida, air, dan juga energi, tetapi tidak sebanding dengan output pertanian yang dihasilkan (Kah et al., 2019).

Sumber Badan Pusat Statistik (BPS) Indonesia pada September 2021 mencatat luas lahan pertanian di Indonesia adalah sekitar 25 juta hektar, yang menjadikan Indonesia salah satu negara dengan areal pertanian terluas di dunia. Ini mencakup berbagai jenis pertanian, termasuk pertanian padi, sawit, karet, kakao, kopi, dan banyak tanaman lainnya. Beberapa dekade terakhir, pertanian Indonesia telah menghadapi sejumlah masalah serius. Perubahan iklim yang semakin ekstrem, peningkatan populasi, dan tuntutan untuk produksi pangan yang lebih tinggi semuanya menjadi tantangan yang memerlukan solusi inovatif. Akibatnya, sistem pertanian baru diperlukan, yaitu sistem yang tidak hanya dapat mencapai tingkat hasil pangan yang jauh lebih optimal daripada bertani secara konvensional, tetapi juga lebih ramah lingkungan. Sistem nanoteknologi dalam bidang pertanian merupakan solusi yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan hasil pertanian masa depan (Arora et al., 2022, dan Haris et al., 2022).

Nanoteknologi adalah disiplin ilmu yang memungkinkan kita untuk memahami dan memanipulasi materi di tingkat atom dan molekul, dan penerapannya dalam pertanian memiliki potensi untuk mengatasi tantangan-tantangan kritis yang dihadapi oleh Indonesia. Banyak penerapan nanoteknologi yang menjanjikan di industri yang memberikan dampak signifikan terhadap masyarakat. Sebagai contoh potensi limbah pengolahan pertanian atau secara alami seperti buah-buahan dan rempah-rempah, memiliki potensi yang signifikan untuk diterapkan dalam nanoteknologi. Semua produk ini dimanfaatkan karena sifat uniknya seperti warna, aroma, rasa, dan pengawetan makanan (Mandal et al., 2023).

Para peneliti pertanian dari seluruh dunia telah berusaha untuk mengembangkan lebih banyak sifat tanaman, seperti membuat tanaman bebas virus dan menghasilkan bibit bervariasi unggul dengan cara rekayasa genetika (Yanuar et al., 2014; Zhi et al., 2022; Almeida et al., 2022). Nanoteknologi digunakan dalam pertanian demi mengoptimalkan output tanaman dengan mengurangi pemanfaatan pupuk biasa, penggunaan pestisida, dan bahan kimia lainnya. Ini dilakukan dengan memonitor langsung keadaan tanah, seperti perakaran, dan menggunakannya melalui kontak langsung terhadap target tanaman untuk menghindari pemborosan (Yanuar & Widawati, 2014).

Menurut penelitian (Sadeghi et al., 2017) nanoteknologi menawarkan peluang baru bagi industri pangan dan pertanian dan beberapa penerapannya dapat ditemukan pada berbagai tahap rantai produksi pangan. Bahan nano bisa untuk mendeteksi patogen hewan dan tumbuhan; makanan dan pakan: bahan tambahan makanan sebagai penambah warna dan rasa, suplemen makanan (misalnya untuk meningkatkan ketersediaan hayati zat besi atau elemen lainnya), struktur makanan baru (misalnya nano-emulsi untuk mengurangi kandungan lemak),

partikel nano untuk makanan yang dapat dimakan dan kemasan makanan (nanopartikel dengan karakteristik antimikroba atau antioksidan untuk meningkatkan pengawetan bahan makanan), suplemen makanan: suspensi nanopartikel sebagai antimikroba, nano-enkapsulasi untuk pengiriman nutraceuticals yang ditargetkan

METODE

Penelitian ini menggunakan metode telaah pustaka atau literature review, yang bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis literatur yang relevan mengenai Nanoagroteknologi untuk teknologi pertanian berkelanjutan. Pendekatan ini memungkinkan analisis mendalam terhadap hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan, sehingga dapat memberikan gambaran komprehensif tentang perkembangan teknologi smart technology.

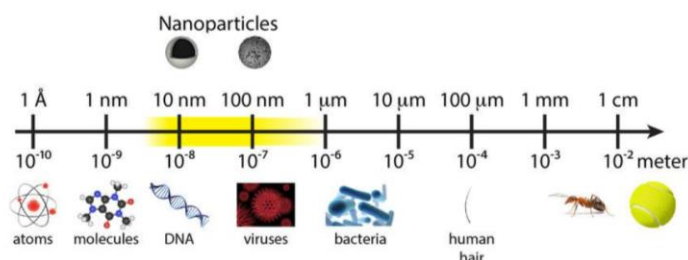
Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup artikel jurnal, buku, prosiding konferensi, dan dokumen terkait lainnya yang diperoleh dari database ilmiah terpercaya. Analisis data dilakukan dengan pendekatan kualitatif menggunakan metode tematik untuk mengidentifikasi pola, tema, dan tren dalam literatur. Langkah-langkah analisis meliputi identifikasi tema utama, sintesis informasi, dan evaluasi kritis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Nanoteknologi, Keunggulan, dan Implementasinya

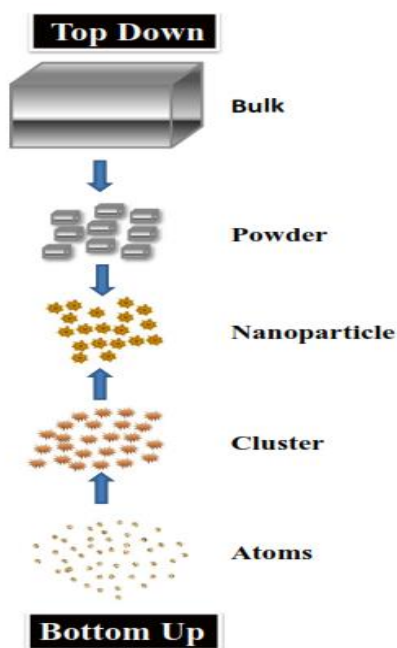
Nanoteknologi adalah ilmu pengetahuan tentang rekayasa yang menghasilkan zat, susunan bentuk fungsional, dan bahan-bahan alam pada skala nanometer. Dengan kata lain, nanoteknologi mencakup desain, karakterisasi, aplikasi, produksi, dan pemasaran struktur pada skala nanometer (Pandey & Jain, 2020). Zat dengan ukuran nanometer akan bersifat lebih baik secara kimia dan fisika dibandingkan zat dengan ukuran yang lebih besar (bulk). Mereka juga memiliki sifat yang lebih kaya karena mereka menghasilkan sifat yang tidak dimiliki oleh material ukuran besar. Pengendalian ukuran zat/benda, penyusunan takaran kimiawi, perubahan permukaan, dan pengendalian interaksi antar zat/partikel memungkinkan perubahan sejumlah sifat tersebut. Nanodot atau quantum dot, nanowire, dan carbon nanotube adalah beberapa contoh zat/benda karya manusia dalam skala nano, yaitu zat-zat yang ukurannya di bawah 100 nm.

Nanoteknologi adalah cabang ilmu yang mencakup berbagai bidang, termasuk bioteknologi, pengolahan industri teknologi, dan teknik kimia dan material. Nanoteknologi melibatkan manipulasi partikel dalam skala nanometer dan mencakup berbagai disiplin ilmu (Villena de Francisco & García-Esteva, 2018). Skala nanometer mencakup dimensi antara 1 dan 100 nanometer (Chen, 2018). Satuan panjang nanoteknologi, sepemiliar (10^{-9}) meter, jauh lebih kecil dari sehelai rambut manusia, yang memiliki lebar 80.000–100.000 nanometer (Saritha et al., 2022).



Gambar 1. Evaluasi ukuran material nano dengan berbagai objek

Ada dua pendekatan yang digunakan untuk merepresentasikan material nano, yaitu pendekatan *top down* and *bottom up*. Pendekatan *top down* mencakup pembentukan struktur skala nano dari struktur yang berukuran lebih besar menjadi skala nano dengan pemecahan, sedangkan *bottom up* berlaku dalam biologi proses (Bala et al., 2023). Pendekatan dari *bottom up* pada dasarnya berkaitan dengan pembentukan bahan organik dan anorganik ke dalam struktur yang terdefinisi dengan baik. Bahan-bahan tersebut dapat disintesis menjadi berbagai bentuk nanopartikel yang memiliki beberapa sifat seperti optik, biologis, dll. Sifat-sifat ini memiliki aplikasi yang luas di berbagai bidang seperti seperti obat-obatan, elektronik, telekomunikasi, pertanian, dll.



Gambar 2. Pendekatan *top down* dan *bottom up* pada pembuatan nanomaterial (Kumar et al., 2019)

Ada dua perbedaan antara metode *top-down* dan *bottom-up*: (1) Metode *top-down* memulai pembuatan dari struktur yang lebih besar, di mana blok bangunan awal lebih kecil dari desain akhir; (2) Metode pembuatan dari bawah ke atas dapat menghasilkan struktur dengan permukaan dan tepi yang sempurna (tidak kusut dan tidak mengandung rongga, dll.), tetapi metode pembuatan dari bawah ke atas tidak dapat menghasilkan permukaan dan tepi yang sempurna karena blok bangunan awal lebih kecil dari desain akhir; (3) Teknologi manufaktur *bottom-up* lebih baru daripada *top-down* dan diharapkan akan menjadi alternatif untuk *top-down* dalam beberapa aplikasi, seperti membuat transistor; (4) Produk yang dibuat dengan metode *bottom-up* lebih presisi, karena mereka dapat mengontrol dimensi material dengan lebih baik, dan karena itu dapat memproduksi struktur yang lebih kecil; dan (5) Metode *top-down* menghemat lebih banyak bahan karena menghasilkan lebih banyak komponen yang tidak berguna.

Nanoteknologi memiliki banyak manfaat yang dapat dimanfaatkan dalam berbagai aspek kehidupan. Rahasia terletak pada skala 1 per 1 miliar meter, atau nanometer, yang diketahui menghasilkan sifat dan perilaku baru. Ketika partikel berada di bawah 100 nm, karakteristik seperti konduktivitas, reaktivitas, suhu leleh, dan sifat mekaniknya berubah. Karakteristik utama yang memberikan sifat khusus pada material nano adalah ukurannya yang kecil, yang meningkatkan luas permukaan, mencapai reaktivitas yang lebih tinggi (Gupta et al., 2023). Di

sisi lain, dalam struktur nano ditemukan efek kuantum, yang yang memberi material nano sifat-sifat menarik, seperti misalnya elektron yang bergerak dalam partikel nano hanya dapat memiliki energi tertentu (tingkat energi yang diizinkan) . Saat ukurannya diperkecil, energi ini perubahan tingkat energi ini mengakibatkan perubahan katalitik, listrik, magnetic atau sifat optiknya jika dibandingkan dengan formulasi konvensional bahan yang sama (Villena de Francisco & García-Estepa, 2018). Hadirnya teknologi yang dapat memanipulasi partikel dalam skala nanometer ini menjanjikan potensi yang sangat besar untuk berkontribusi pada kemajuan yang signifikan di berbagai bidang teknologi.

Material berskala nanometer memiliki area permukaan yang lebih besar, yang menjadikannya lebih tangguh, kokoh, serta lebih konduktif dibandingkan zat dengan ukuran yang lebih besar. Hasil-hasil bentukan dari nanoteknologi juga lebih berukuran kecil, lebih ramah harga, lebih ringan, dan lebih efektif, dan tidak membutuhkan bahan mentah yang banyak untuk energi proses produksinya. Mengambil contoh kunyit, Prof. Nurul Taufiq Rochman seorang pionir nanoteknologi di Indonesia menjelaskan keunggulan nanoteknologi. Meskipun lima ton rempah ini dihargai 10 juta rupiah, harga yang sama dapat diperoleh dengan mengolahnya menjadi nanopartikel kunyit hanya dengan menjual 5 kilogram. Dengan kata lain, manfaat nano teknologi adalah seribu kali lipat. Tidak mengherankan jika banyak negara bersaing untuk mengembangkan teknologi ini.

Dalam sepuluh tahun terakhir, penggunaan dan penelitian nano telah meningkat pesat. Nanoteknologi telah masuk ke banyak bidang kehidupan manusia, seperti bidang tekstil, makanan, ranah komestik, bidang kesehatan, packing makanan, dan banyak barang-barang siap pakai lainnya. Teknologi bidang nano yang berkembang pesat menghadirkan tantangan sekaligus peluang untuk tiap negara sebagai senjata menjadi tujuan pasar atau ikut berperan dalam pasar global (Pokrajac et al., 2021). Penelitian dalam bidang nano meningkat pesat di tingkat nasional dan regional. Menurut *Food and Agriculture Organization (FAO)* dan *World Health Organization (WHO)*, teknologi bidang nano memiliki potensi untuk menghasilkan produk pertanian inovatif yang mencakup perlakuan air, produksi pangan, pengolahan, pengawetan, dan pengemasan. Menurut mereka, ini dapat meningkatkan nilai produk dan daya saingnya, serta menguntungkan konsumen, industri pangan, dan petani (Ariningsih, 2016).

Berdasarkan data yang dirangkum situs terkemuka nanoteknologi, Statnano.com, hingga saat ini sudah ada 11.158 produk nanoteknologi yang dihasilkan 3.897 perusahaan dari 68 negara di dunia. Negara penghasil nanoteknologi paling banyak adalah China, disusul oleh India dan USA, sedangkan Indonesia berada pada posisi ke-37 (Statnano, 2023).

Menurut Rochman dan Brama (2009), nanoteknologi mulai diperkenalkan di Indonesia seiring dengan kembalinya peneliti-peneliti tanah air yang belajar di luar negeri pada awal tahun 2000. Para peneliti mengadakan riset-riset nanosains di badan penelitian milik pemerintah dan universitas. Kemudian disusul dengan berdirinya Mochtar Riyadi Institute for Nanotechnology and Bioengineering (MRIN) pada tahun 2004. Sebuah yayasan yang dibangun oleh pendiri Lippo grup yang menginspirasi dibuatnya kebijakan-kebijakan terkait nanoteknologi beserta penelitian dan pengembangannya. Selain itu, Rencana Induk Riset Nasional (RIRN) Tahun 2017–2045 dibuat oleh pemerintah untuk menyesuaikan kebutuhan riset masa depan dengan arah pembangunan nasional dalam bidang ilmu pengetahuan dan teknologi. Dalam rencana ini, nanoteknologi dicantumkan sebagai salah satu prioritas negara. Industri yang menjadi prioritas ialah industri pangan dan alat kesehatan dengan fokus riset pangan dan pertanian, obat, dan kesehatan dan material maju (Ristekdikti, 2017). Berdasarkan data Statnano.com (2023), Indonesia telah menghasilkan 33 produk berbasis nanoteknologi di

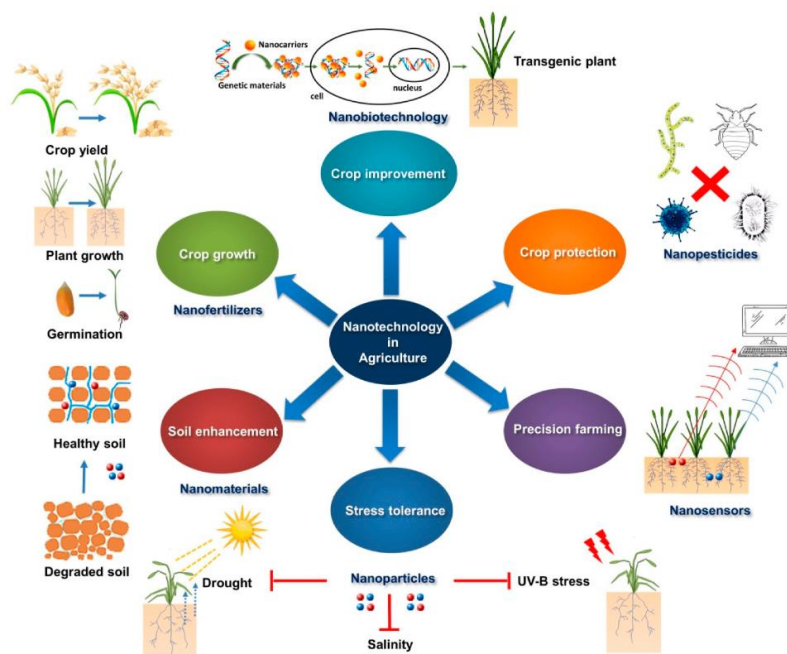
bidang industri pertanian, pangan, tekstil, otomotif, rumah tangga, minyak, kosmetik, kesehatan, energi terbarukan, dan industri lainnya dari 14 perusahaan. Perusahaan yang telah memproduksi produk-produk ini diantaranya K-Link, Nanotech Indonesia, Nano Ceramic Indonesia, Millionaire Club Indonesia, Rhizoma Worldwide, Gizi Indonesia, PT Nanocoating Indonesia, PT Nanotech Herbal Indonesia.

B. Agro-Nanoteknologi untuk Pertanian Berkelanjutan

Untuk mencegah kelaparan global dalam menghadapi masa depan penuh tantangan, sistem cara pertanian berbasis efisien dan berkelanjutan sangat penting. Produksi makanan dan sistem distribusi yang lebih baik di seluruh dunia telah didorong oleh pergantian iklim, pengotoran lingkungan, perubahan iklim, dan peningkatan kebutuhan pada energi dan air. Sistem saat ini sangat bergantung pada pupuk klasik, penggunaan pestisida, serta air dan energi, tetapi tidak relevan dengan produk yang diperoleh. Karena itu, sistem pertanian baru yang dapat mencapai titik optimal capaian hasil dibandingkan sistem pertanian klasik diperlukan. Untuk keamanan pangan di masa mendatang, hasil penelitian saat ini menunjukkan bahwa nanoteknologi adalah metode yang menjanjikan untuk meningkatkan hasil pertanian.

Nanoteknologi menawarkan peluang baru bagi industri pangan dan pertanian dan beberapa penerapannya dapat ditemukan pada berbagai tahap rantai produksi pangan: bahan nano bisa untuk mendeteksi patogen hewan dan tumbuhan; makanan dan pakan: bahan tambahan makanan sebagai penambah warna dan rasa, suplemen makanan (misalnya untuk meningkatkan ketersediaan hayati zat besi atau elemen lainnya), struktur makanan baru (misalnya nano-emulsi untuk mengurangi kandungan lemak), partikel nano untuk makanan yang dapat dimakan dan kemasan makanan (nanopartikel dengan karakteristik antimikroba atau antioksidan untuk meningkatkan pengawetan bahan makanan), suplemen makanan: suspensi nanopartikel sebagai antimikroba, nano-enkapsulasi untuk pengiriman nutraceuticals yang ditargetkan.

Kemajuan dalam nanoteknologi dapat dieksplorasi untuk meningkatkan perbaikan tanaman yang berkelanjutan. Baru-baru ini, nanoteknologi telah membuat revolusi besar-besaran dalam memecahkan berbagai masalah yang dihadapi oleh populasi manusia, termasuk sektor pertanian, lingkungan, dan sektor pangan. Di bidang pertanian, nanoteknologi memiliki implikasi pada setiap tahap pertanian, termasuk perkecambahan benih, pertumbuhan, panen, pemrosesan, penyimpanan, dan pengangkutan produk pertanian. Pupuk nano, herbisida nano, fungisida nano, biosensor nano, pembawa genetik berskala nano, agen bioremediasi nano, agen dan nanokomposit untuk pengemasan adalah aplikasi baru nanoteknologi dalam perbaikan tanaman area (Saritha et al., 2022).



Gambar 3. Beberapa aplikasi nanoteknologi di bidang pertanian

Para peneliti pertanian di seluruh dunia telah berusaha untuk mengembangkan lebih banyak sifat tanaman, seperti membuat tanaman bebas virus dan menghasilkan bibit bervariasi unggul dengan cara rekayasa genetika (Yanuar & Widawati, 2014; de Almeida et al., 2022; Zhi et al., 2022). Nanoteknologi digunakan dalam pertanian demi meningkatkan output hasil tanaman dengan mengurangi penggunaan pestisida, pupuk konvensional, dan kebutuhan dalam aspek lainnya melalui pantauan langsung terhadap kondisi tanah, misalnya perakaran, dan meningkatkan reaktivitas dan sifat mekanik.

Di bidang pertanian, perkembangan penerapan nanoteknologi termasuk produksi dan perlindungan tanaman dengan penekanan pada pupuk nano, nanopestisida, nanobiosensor, dan strategi remediasi berbasis nano untuk tanah yang terkontaminasi. Nanomaterial memainkan peran penting mengenai nasib, mobilitas dan toksisitas polutan tanah dan merupakan bagian penting dari berbagai strategi remediasi biotik dan abiotik. Efisiensi dan nasib bahan nano sangat ditentukan oleh sifat dan interaksinya dengan konstituen. Setelah masuk ke dalam sistem tanah, material nano mungkin saja masuk ke dalam sistem tanah mempengaruhi kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman dalam konteks pengaruhnya terhadap pelepasan unsur hara dalam target tanah, biota tanah, bahan organik tanah dan respon morfologi dan fisiologis tanaman (Usman et al., 2020).

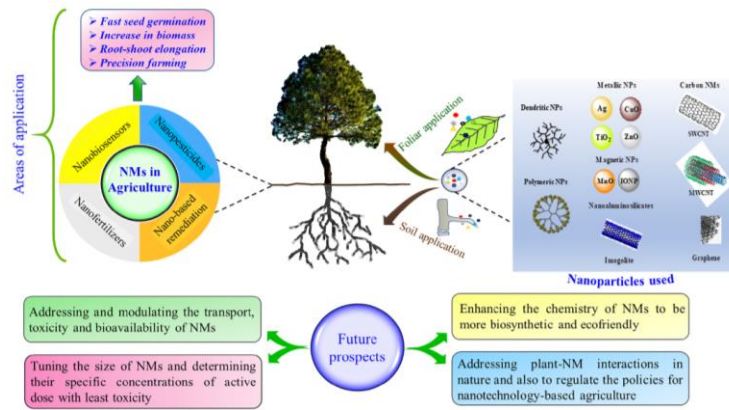
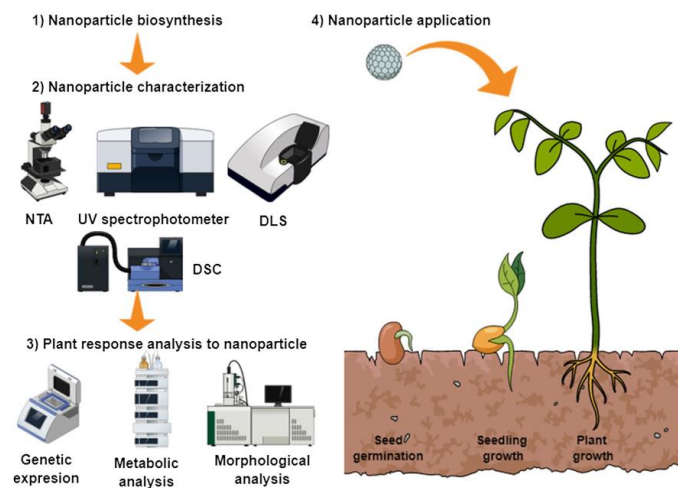


Fig. 1. Different nanomaterials used for agriculture nanotechnology and route of applications.

Gambar 4. Perbedaan penggunaan nanomaterial untuk pertanian dan rute aplikasinya (Acharya & Pal, 2020)

1. Nanofertilizer (Pupuk Nano)

Defisiensi unsur hara tanah (Zn, Se, S, dll) dan penyebaran berbagai macam hama merupakan masalah pertanian utama yang perlu diatasi untuk menjamin hasil panen yang tinggi dan berkualitas, sehingga diperlukan penggunaan pupuk dan pestisida untuk penyediaan makronutrien tanah dalam jumlah yang tinggi (Sahoo et al., 2023)(Kumar et al., 2019). Penggunaan pupuk mineral yang berlebihan telah menghasilkan dampak yang berbahaya bagi ekosistem. Teknologi nano merupakan strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan produktivitas tanaman sambil meminimalkan input pupuk. Pupuk nano dapat berkontribusi pada pelepasan nutrisi yang lambat dan berkelanjutan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan nutrisi pada tanaman (Fincheira et al., 2021).



Gambar 4. Teknik terkini untuk mendeskripsikan material nano untuk modulasi pertumbuhan tanaman (Fincheira et al., 2021)

Menurut berbagai penelitian, kualitas pupuk, yang merupakan komponen utama dalam pertanian, terus meningkat. BPPT telah mengembangkan teknologi nano untuk membuat pupuk lepas lambat atau SRF (pupuk pelepasan lambat) di Indonesia. Menurut Keti et al. (2015), fertilizer jenis SRF yang memanfaatkan nanoteknologi ini memiliki kemampuan untuk mengoptimalkan efisiensi daya serap pupuk pada tanaman mencapai 65-75 persen, yang mana

hal ini lebih optimal sebesar 40% dibandingkan pupuk biasa. Prinsip utama dari pupuk berbahan nano adalah mengoptimalkan efisiensi daya serap terhadap nutrisi dengan cara mengkoordinasi besarnya nutrisi yang dilepas sesuai dengan takaran yang tanaman butuhkan. Karena ukuran partikel pupuk yang lebih kecil dan luas permukaan material pupuk yang lebih besar, daya serap tanaman terhadap pupuk dapat meningkat. Keadaan pori-pori tanaman berukuran skala nano membuat ukuran zat pupuk dan besarnya pori yang dimiliki tanaman sebanding. Pemanfaatan nanofertilizer dapat juga dimanfaatkan dalam pengurangan pencemaran lingkungan melalui minimalisasi pencucian atau leaching.

2. *Nano pesticide (Pestisida Nano)*

Pestisida adalah bahan kimia yang digunakan untuk melawan hama dan penyakit tanaman. Organofosfat, diklorinasi hidrokarbon, karbamat, dan karbamid adalah turunan bahan aktif yang paling umum digunakan. Formulasi pestisida tradisional memiliki berbagai keterbatasan seperti kandungan pelarut organik yang tinggi, debu melayang, dispersibilitas rendah, kelemahan seperti kemampuan untuk bertahan di tanah untuk waktu yang lama, dan kelemahan serupa lainnya. Karena keterbatasan ini, sebagian besar pestisida hanya tersisa 1% di permukaan dan lainnya malah menjadi mencemari lingkungan. Hal ini tentu saja membuat tidak efektif dan efisien, serta menjadi factor pencemar lingkungan (Abdollahdokht et al., 2022).

Menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), pestisida merupakan ancaman besar terhadap lingkungan dan manusia. Untuk alasan ini, pestisida baru dengan novel komponen alami dan sintetis dikembangkan, yang kurang beracun, spesifik terhadap hama sasaran, efektif dalam skala kecil jumlah, dan terurai lebih cepat dibandingkan konvensional pestisida. Baru pestisida adalah terbagi menjadi dua kategori yaitu biopestisida dan nano pestisida.

Nano pestisida mengandung partikel sangat kecil yang bersifat pestisida, sifat yang dapat digunakan secara efektif dalam mengendalikan hama. Penggunaan pestisida meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit, menurunkan fiksasi nitrogen dan meningkatkan bioakumulasi pestisida. Penggunaan pestisida nano meningkatkan kemanjuran pestisida, mengurangi masalah lingkungan dan mengurangi dosis yang dibutuhkan (Bala et al., 2023).

Pestisida berbahan dasar nanoteknologi juga sudah mengalami rekayasa dengan pemanfaatan Cu, SiO₂, ZnO, dan TiO₂ sebagai partikel penyusun dalam nano besi-oksida. Tanaman dapat dilindungi oleh partikel nano ini karena mereka mencegah pertumbuhan patogen. Aplikasi teknologi ini dapat dilihat pada pemanfaatan nano silika sebagai pembunuh serangga yang bersifat bahaya tanaman jika masuk ke dalam jaringan kulit serangga patogen tersebut. Hal ini terjadi karena nano silika memiliki sifat yang hidrofobik, yang membuatnya mudah berbaur pada kulit serangga yang juga bersifat hidrofobik. Selain itu, pestisida banyak digunakan untuk meningkatkan produktivitas pertanian, namun daya rekat dan pengendapan yang lemah menyebabkan pemanfaatan yang rendah. Untuk menjawab hal tersebut diciptakan sebuah formulasi pestisida nano (pestisida nano tebukonazol) yang bersifat melekat pada daun dan terdispersi dalam air melalui metode presipitasi nanopartikel cepat, yaitu flash nanopresipitasi, menggunakan kopolimer yang responsif terhadap suhu poli-(2-(dimetilamino)etilmetilakrilat)-b-poli (ϵ -kapolakton) sebagai pembawa (Tang et al., 2023).

Dengan ekstrak minyak serai wangi, nanoteknologi dapat digunakan sebagai nanopestisida alami yang aman bagi lingkungan dan mengikuti prinsip cara pertanian berkelanjutan, bersifat mudah diolah, hasil efektif, dan cara efisien. Septriani et al. (2020)

menemukan bahwa penggunaan nanopestisida alami ini mengurangi kehilangan hasil tanaman cabai hingga 79% dan intensitas penyakit kuning hingga di atas 50%.

Nanoteknologi telah digunakan sebagai nanobiopestisida. Salah satu penggunaan nanobiopestisida adalah dengan menggunakan bakteri *Bacillus subtilis* dalam upaya mengendalikan hama padi. Bakteri ini telah terbukti mampu menghentikan pertumbuhan hama pada tanaman padi, melindunginya dari serangan parasite baik pada aspek tanah, pertumbuhan benih, dan daun, serta pastinya lebih ramah lingkungan.

3. Nano Sensor

Nanosensor dapat didefinisikan sebagai perangkat berskala nano yang menangkap informasi dari dunia makroskopis dan menyampaikan informasi itu melalui penggunaan nanopartikel untuk membantu mendeteksi molekul target yang diinginkan. Di dalam nanosensor, nano komponen bertindak sebagai transduser membantu dengan sinyal produksi. Sebuah analit terdeteksi oleh sensor nano mungkin termasuk fisik analit (misalnya ultraungu radiasi), bahan kimia analit (misalnya, pestisida dan polutan lainnya), dan biologis analit (misalnya, alergen, penyakit biomarker dan organisme patogen) (Magnabosco et al., 2023). Dari beberapa teknologi berbahan nano, sensor nano adalah aspek yang tidak kalah penting. Sensor nano terdiri dari sensor nano elektrik dan biosensor nano. Sensor nano ini sangat penting untuk mendeteksi dan memantau penyakit, toksisitas, kualitas tanah, dan aspek keamanan tanaman budidaya lainnya.

Sensor nano dengan menggunakan zat nano berbahan tembaga yang dimodifikasi sebagai pengganti elektroda yang sebelumnya adalah emas merupakan satu model dalam sensor nano. Sensor nano ini menghitung jumlah asam salisilat yang diproduksi tanaman sebagai cara untuk melakukan deteksi terhadap invasi jamur yang bersifat patogen. Sebuah senyawa, asam salisilat, dapat digunakan untuk mengukur tingkat stress yang dialami tanaman (Wang et al., 2010). Nanoteknologi juga telah digunakan sebagai nanosensor pada pupuk. Karena mereka dapat mengidentifikasi hama dan gulma dalam waktu nyata dan dari jarak jauh, nanosensor ini sangat bermanfaat untuk pertanian presisi. Nanosensor juga meningkatkan kualitas tanaman dan mengurangi kerugian pasca panen.

4. Remediasi Tanah

Proses membersihkan permukaan tanah yang tercemar dikenal sebagai remediasi tanah. Remediasi tanah dapat dilakukan secara in-situ (atau on-site) atau exsitu (atau off-site). Pembersihan yang dilakukan di lokasi disebut pembersihan on-site. Pembersihan ini tidak hanya lebih mudah, tetapi juga lebih murah. Dua komponen pembersihan ini adalah bioremediasi dan venting (injeksi). Untuk saat ini, pembersihan di luar lokasi mencakup penggalian tanah yang tercemar sebelum diangkut ke lokasi yang aman. Setelah itu, tanah dari zat pencemar dibersihkan di area aman. Ini dilakukan dengan cara berikut: tanah disimpan di bak atau tangki yang kedap, kemudian ke ddalamnya dilakukan pemompaan zat pembersih, sehingga zat pencemar terkeluarkan dari bak. Zat-zat ini kemudian mengalami pengolahan lebih lanjut di pihak pengolah limbah. Pembersihan air semacam ini lebih mahal dan lebih kompleks.

Menggunakan bahan nano yang direkayasa secara khusus (ENMs) adalah sebuah strategi remediasi inovatif untuk daerah yang sudah terkandung pencemar. Kesulitan dalam memulihkan lingkungan yang tercemar adalah heterogenitas dan kompleksitas air tanah antarmuka, sebagai efisiensi dari itu interaksi agen target-target polutan. Ukurannya yang kecil

dan permukaan yang sangat reaktif memberi NP potensi reaktivitas dan keserbagunaan yang kompleks. ENM bisa menghapus secara efektif banyak polutan melalui kombinasi dari adsorpsi dan redoks yang didegradasi dalam satu langkah atau dengan perawatan berulang/berurutan. Strategi ini digunakan dalam perbaikan aplikasi mengambil keuntungan dari imobilisasi / adsorpsi proses, untuk misalnya di terkontaminasi logam tanah (Magnabosco et al., 2023).

Meskipun Indonesia mungkin masih menghadapi kendala dalam menghasilkan produk nanoteknologi yang sepenuhnya terintegrasi dalam pertanian, langkah-langkah positif dan upaya kolaboratif antara para peneliti, pemerintah, dan pemangku kepentingan lainnya untuk terus bekerja sama dalam mengembangkan nanoteknologi yang berkelanjutan dan bermanfaat bagi pertanian Indonesia untuk mengatasi tantangan ini. Dengan investasi yang lebih besar dalam penelitian, infrastruktur, regulasi yang bijaksana, dan peningkatan kesadaran, Indonesia memiliki potensi besar untuk mengembangkan dan mengadopsi nanoteknologi yang dapat menghasilkan hasil pertanian yang lebih baik dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Perubahan iklim global dan peningkatan populasi yang cepat baik di tingkat nasional maupun internasional makin memberikan tantangan bagi ketahanan pangan, dan hal ini menuntut metode perbaikan tanaman yang efisien yang memastikan kualitas dan kuantitas tanaman yang unggul. Sistem nanoteknologi dalam bidang pertanian merupakan solusi yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan hasil pertanian masa depan. Sistem ini memungkinkan pencapaian tingkat produksi makanan yang jauh lebih tinggi daripada sistem pertanian klasik, namun juga lebih ramah lingkungan. Perkembangan penerapan nanoteknologi di bidang pertanian termasuk produksi dan perlindungan tanaman dengan penekanan pada pupuk nano, nanopestisida, nanobiosensor, dan strategi remediasi berbasis nano untuk tanah yang terkontaminasi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih penulis ucapkan kepada Prodi Doktorat Pendidikan IPA Universitas Sebelas Maret, Surakarta dan Dosen Pengampu mata kuliah nanoteknologi yaitu Dr.Eng. Risa Suryana, S.Si., M.Si.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdollahdokht, D., Gao, Y., Faramarz, S., Poustforoosh, A., Abbasi, M., Asadikaram, G., & Nematollahi, M. H. (2022). Conventional agrochemicals towards nano-biopesticides: an overview on recent advances. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 9(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s40538-021-00281-0>
- Acharya, A., & Pal, P. K. (2020). Agriculture nanotechnology: Translating research outcome to field applications by influencing environmental sustainability. *NanoImpact*, 19(June). <https://doi.org/10.1016/j.impact.2020.100232>
- Ariningsih, E. (2016). Prospek Penerapan Teknologi Nano dalam Pertanian dan Pengolahan Pangan di Indonesia. *Forum Penelitian Agro Ekonomi*, 34(1), 1. <https://doi.org/10.21082/fae.v34n1.2016.1-20>
- Bala, M., Kumar Bansal, S., & Fatima, F. (2023). Nanotechnology: A boon for agriculture. *Materials Today: Proceedings*, 73, 267–270. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.498>

- Chen, H. (2018). Metal based nanoparticles in agricultural system: Behavior, transport, and interaction with plants. *Chemical Speciation and Bioavailability*, 30(1), 123–134. <https://doi.org/10.1080/09542299.2018.1520050>
- de Almeida, N. V., Rivas, E. B., & Cardoso, J. C. (2022). Somatic embryogenesis from flower tepals of *Hippeastrum* aiming regeneration of virus-free plants. *Plant Science*, 317(December 2021), 111191. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2022.111191>
- Fincheira, P., Tortella, G., Seabra, A. B., Quiroz, A., Diez, M. C., & Rubilar, O. (2021). Nanotechnology advances for sustainable agriculture: current knowledge and prospects in plant growth modulation and nutrition. *Planta*, 254(4), 1–25. <https://doi.org/10.1007/s00425-021-03714-0>
- Gupta, A., Rayeen, F., Mishra, R., Tripathi, M., & Pathak, N. (2023). Nanotechnology applications in sustainable agriculture: An emerging eco-friendly approach. *Plant Nano Biology*, 4(December 2022), 100033. <https://doi.org/10.1016/j.plana.2023.100033>
- Kah, M., Tufenkji, N., & White, J. C. (2019). Nano-enabled strategies to enhance crop nutrition and protection. *Nature Nanotechnology*, 14(6), 532–540. <https://doi.org/10.1038/s41565-019-0439-5>
- Kumar, A., Gupta, K., Dixit, S., Mishra, K., & Srivastava, S. (2019). A review on positive and negative impacts of nanotechnology in agriculture. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 16(4), 2175–2184. <https://doi.org/10.1007/s13762-018-2119-7>
- Magnabosco, P., Masi, A., Shukla, R., Bansal, V., & Carletti, P. (2023). Advancing the impact of plant biostimulants to sustainable agriculture through nanotechnologies. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 10(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s40538-023-00491-8>
- Mandal, D., Sarkar, T., & Chakraborty, R. (2023). Critical Review on Nutritional, Bioactive, and Medicinal Potential of Spices and Herbs and Their Application in Food Fortification and Nanotechnology. In *Applied Biochemistry and Biotechnology* (Vol. 195, Issue 2). Springer US. <https://doi.org/10.1007/s12010-022-04132-y>
- Pandey, G., & Jain, P. (2020). Assessing the nanotechnology on the grounds of costs, benefits, and risks. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s43088-020-00085-5>
- Pokrajac, L., Abbas, A., Chrzanowski, W., Dias, G. M., Eggleton, B. J., Maguire, S., Maine, E., Malloy, T., Nathwani, J., Nazar, L., Sips, A., Sone, J., Van Den Berg, A., Weiss, P. S., & Mitra, S. (2021). Nanotechnology for a Sustainable Future: Addressing Global Challenges with the International Network4Sustainable Nanotechnology. *ACS Nano*, 15(12), 18608–18623. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c10919>
- Sadeghi, R., Rodriguez, R. J., Yao, Y., & Kokini, J. L. (2017). Advances in Nanotechnology as They Pertain to Food and Agriculture: Benefits and Risks. *Annual Review of Food*

- Science and Technology*, 8, 467–492. <https://doi.org/10.1146/annurev-food-041715-033338>
- Sahoo, A., Sethi, J., Satapathy, K. B., Sahoo, S. K., & Panigrahi, G. K. (2023). Nanotechnology for precision and sustainable agriculture: recent advances, challenges and future implications. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, 8(3), 775–787. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00277-7>
- Saritha, G. N. G., Anju, T., & Kumar, A. (2022). Nanotechnology - Big impact: How nanotechnology is changing the future of agriculture? *Journal of Agriculture and Food Research*, 10(November), 100457. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100457>
- Tang, J., Tong, X., Chen, Y., Wu, Y., Zheng, Z., Kayitmazer, A. B., Ahmad, A., Ramzan, N., Yang, J., Huang, Q., & Xu, Y. (2023). Deposition and water repelling of temperature-responsive nanopesticides on leaves. *Nature Communications*, 14(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41878-3>
- Usman, M., Farooq, M., Wakeel, A., Nawaz, A., Cheema, S. A., Rehman, H. ur, Ashraf, I., & Sanaullah, M. (2020). Nanotechnology in agriculture: Current status, challenges and future opportunities. *Science of the Total Environment*, 721, 137778. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137778>
- Villena de Francisco, E., & García-Estepa, R. M. (2018). Nanotechnology in the agrofood industry. *Journal of Food Engineering*, 238(May), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.05.024>
- Zhi, H., Zhou, S., Pan, W., Shang, Y., Zeng, Z., & Zhang, H. (2022). The Promising Nanovectors for Gene Delivery in Plant Genome Engineering. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(15). <https://doi.org/10.3390/ijms23158501>