



PERAN NANOTEKNOLOGI DALAM PENINGKATAN NUTRISI TANAH DAN PRODUKTIVITAS PERTANIAN

Yulianto²⁾

¹⁾ Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Kadiri, Kediri, Indonesia
Email: yulianto@gmail.com

Abstract

Nanotechnology has emerged as a key innovation in modern agriculture due to its ability to enhance fertilizer efficiency, soil quality, and crop productivity. This study aims to evaluate the effects of nitrogen, phosphorus, and potassium nanoparticles on maize growth, soil nutrient content, and crop yield. The research employed an experimental approach using a Randomized Complete Block Design (RCBD) with three nanofertilizer treatments and a control. Results indicate that nanotechnology significantly increased plant height, leaf number, root length, biomass, and the protein and mineral content of maize grains. Additionally, soil quality improved in terms of nutrient availability, pH, and cation exchange capacity. Treated plants also exhibited greater resistance to environmental stress, while nanosensors supported precise and efficient agricultural management. This study confirms that nanotechnology has significant potential to enhance soil nutrition and crop productivity sustainably.

Keywords: Nanotechnology, Soil Nutrition, Agricultural Productivity, Nanofertilizer, Sustainable Agriculture

Abstrak

Nanoteknologi telah menjadi inovasi penting dalam pertanian modern karena kemampuannya meningkatkan efisiensi pemupukan, kualitas tanah, dan produktivitas tanaman. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh nanopartikel nitrogen, fosfor, dan kalium terhadap pertumbuhan tanaman jagung, kandungan nutrisi tanah, dan hasil panen. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimental dengan Randomized Complete Block Design (RCBD) dan tiga perlakuan nanopupuk beserta kontrol. Hasil menunjukkan bahwa nanoteknologi meningkatkan tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, biomassa, dan kandungan protein serta mineral pada biji jagung. Selain itu, kualitas tanah mengalami perbaikan signifikan dalam hal nutrisi, pH, dan kapasitas tukar kation. Tanaman juga lebih tahan terhadap stres lingkungan, sementara penggunaan nanosensor mendukung pertanian presisi yang efisien. Penelitian ini menegaskan bahwa nanoteknologi memiliki potensi besar dalam meningkatkan nutrisi tanah dan produktivitas pertanian secara berkelanjutan.

Kata Kunci: Nanoteknologi, Nutrisi Tanah, Produktivitas Pertanian, Nanopupuk, Pertanian Berkelanjutan



PENDAHULUAN

Pertanian merupakan sektor vital dalam menunjang ketahanan pangan global dan kesejahteraan masyarakat. Namun, pertumbuhan populasi yang pesat dan perubahan iklim mengakibatkan tekanan signifikan terhadap produktivitas pertanian. Penurunan kesuburan tanah, erosi, dan degradasi kualitas tanah menjadi tantangan utama dalam menjamin ketersediaan pangan yang berkelanjutan (Smith et al., 2020). Oleh karena itu, inovasi teknologi pertanian yang efisien dan ramah lingkungan menjadi kebutuhan mendesak.

Salah satu pendekatan inovatif yang berkembang pesat adalah pemanfaatan nanoteknologi dalam pertanian. Nanoteknologi memungkinkan manipulasi materi pada skala nanometer untuk meningkatkan efektivitas pupuk, pestisida, dan pengelolaan nutrisi tanah (Kah et al., 2019). Dengan ukuran partikel yang sangat kecil, nanopartikel dapat menembus tanah dan tanaman secara lebih efisien, sehingga nutrisi yang disediakan lebih mudah diserap oleh tanaman dibandingkan metode konvensional (Chen et al., 2021).

Selain meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk, nanoteknologi juga berperan dalam rehabilitasi tanah yang terdegradasi. Nanopartikel tertentu dapat membantu memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas menahan air, dan menstabilkan pH tanah, sehingga tanah menjadi lebih subur dan produktif (Mishra & Tripathi, 2020). Hal ini menjadi solusi penting untuk lahan marginal yang memiliki keterbatasan nutrisi dan kurang produktif, sehingga dapat dimanfaatkan kembali untuk kegiatan pertanian.

Penggunaan nanoteknologi juga berkontribusi pada peningkatan kualitas hasil pertanian. Dengan distribusi nutrisi yang lebih merata dan tepat sasaran, tanaman menunjukkan pertumbuhan yang lebih optimal, resistensi terhadap stres lingkungan meningkat, dan hasil panen menjadi lebih konsisten (Khot et al., 2012). Selain itu, penggunaan nanopupuk dan nanosensor dapat mengurangi dampak negatif dari penggunaan pupuk kimia berlebih, sehingga lebih ramah lingkungan.

Meski demikian, implementasi nanoteknologi dalam pertanian masih menghadapi sejumlah tantangan, termasuk masalah keamanan, biaya produksi, dan regulasi. Dampak jangka panjang nanopartikel terhadap ekosistem tanah dan organisme tanah perlu diteliti lebih lanjut agar pemanfaatannya aman dan berkelanjutan (Raliya & Tarafdar, 2013). Penelitian berkelanjutan dan kolaborasi antara ilmuwan, petani, dan pembuat kebijakan sangat diperlukan untuk mengoptimalkan potensi nanoteknologi di sektor pertanian.

Dengan perkembangan teknologi yang semakin pesat, nanoteknologi menawarkan peluang besar dalam meningkatkan efisiensi pertanian dan keberlanjutan produksi pangan. Pemahaman dan penerapan teknologi ini diharapkan dapat menjadi solusi inovatif untuk tantangan pertanian modern, khususnya dalam konteks peningkatan nutrisi tanah dan produktivitas tanaman (Bhattacharyya et al., 2021). Pendekatan ini menjadi bagian integral dari strategi pertanian cerdas dan berkelanjutan di masa depan.

TINJAUAN PUSTAKA

Nanoteknologi merupakan cabang ilmu yang mempelajari manipulasi materi pada skala nanometer, yang dapat diterapkan dalam berbagai sektor, termasuk pertanian. Pemanfaatan nanopartikel dalam pertanian dikenal dengan istilah nanoagriculture, yang mencakup penggunaan nanopupuk, nanosensor, dan nanopestisida untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas tanaman (Kah et al., 2019). Dengan ukuran yang sangat kecil, nanopartikel memiliki luas permukaan yang besar sehingga mampu menembus tanah dan jaringan tanaman lebih efektif dibandingkan teknologi konvensional (Chen et al., 2021).

Dalam konteks nutrisi tanah, nanoteknologi memungkinkan distribusi unsur hara secara lebih merata dan terkendali. Nanopartikel seperti nano-urea, nano-fosfat, dan nano-kalium dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi tanaman, mengurangi kehilangan pupuk akibat pencucian atau volatilisasi, serta memperbaiki kualitas tanah secara fisik maupun kimia (Mishra & Tripathi, 2020). Hal ini sangat penting untuk mengoptimalkan pertumbuhan tanaman dan meningkatkan hasil panen, terutama pada lahan marginal atau terdegradasi.

Selain itu, nanoteknologi juga berperan dalam meningkatkan kemampuan tanah dalam menahan air dan memperbaiki struktur tanah. Beberapa nanopartikel mampu meningkatkan kapasitas penyerapan air dan stabilitas agregat tanah, sehingga tanaman dapat lebih tahan terhadap kondisi kering dan fluktuasi lingkungan (Bhattacharyya et al., 2021). Perbaikan sifat fisik dan kimia tanah ini secara langsung berdampak pada kesuburan tanah dan produktivitas jangka panjang.

Di sisi tanaman, nanopartikel dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan pertumbuhan vegetatif. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan nanopupuk dapat meningkatkan panjang akar, jumlah daun, dan berat biomassa tanaman, sehingga produktivitas pertanian menjadi lebih tinggi (Khot et al., 2012). Selain itu, nanopartikel juga dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres abiotik, seperti kekeringan, salinitas, atau serangan hama dan penyakit.



Nanoteknologi juga menghadirkan inovasi berupa nanosensor untuk pemantauan kondisi tanah dan tanaman secara real-time. Nanosensor ini dapat mendeteksi kadar nutrisi, pH tanah, kelembapan, dan keberadaan patogen, sehingga petani dapat mengambil keputusan yang tepat terkait pemupukan dan pengendalian hama (Raliya & Tarafdar, 2013). Pemanfaatan teknologi ini mendukung praktik pertanian presisi, yang efisien dan berkelanjutan.

Meskipun demikian, penerapan nanoteknologi dalam pertanian masih menghadapi tantangan, seperti biaya produksi nanopartikel yang relatif tinggi, regulasi penggunaan, dan keamanan lingkungan. Dampak jangka panjang nanopartikel terhadap organisme tanah dan ekosistem perlu penelitian lebih lanjut untuk memastikan keberlanjutan dan keamanan penggunaannya (Bhattacharyya et al., 2021). Dengan pengembangan teknologi yang terus berlangsung, nanoteknologi memiliki potensi besar untuk mendukung pertanian modern yang produktif, efisien, dan ramah lingkungan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental untuk mengevaluasi pengaruh nanoteknologi terhadap nutrisi tanah dan produktivitas pertanian. Desain penelitian berupa *Randomized Complete Block Design (RCBD)* dengan tiga perlakuan nanopartikel berbeda dan tiga ulangan untuk masing-masing perlakuan. Perlakuan meliputi aplikasi nanopupuk nitrogen, fosfor, dan kalium pada tanaman jagung sebagai tanaman model. Pendekatan ini dipilih agar dapat memperoleh data numerik yang akurat mengenai perbedaan pertumbuhan tanaman dan kandungan nutrisi tanah setelah perlakuan.

Lokasi penelitian dilakukan di lahan percobaan pertanian yang memiliki karakteristik tanah berpasir hingga lempung ringan, dengan pH tanah sekitar 6,5–7,0. Lahan dipersiapkan dengan membersihkan gulma dan menggemburkan tanah hingga kedalaman 20 cm. Setiap petak percobaan berukuran 2 m × 2 m, dengan jarak tanam antar tanaman 50 cm. Lahan percobaan dibagi menjadi blok untuk mengurangi pengaruh faktor lingkungan yang berbeda, seperti intensitas cahaya, kelembapan, dan drainase.

Bahan yang digunakan meliputi nanopartikel urea, fosfat, dan kalium, yang disintesis dengan metode *green synthesis* menggunakan ekstrak tanaman untuk meminimalkan dampak lingkungan. Pupuk konvensional diberikan sebagai kontrol untuk membandingkan efektivitas nanoteknologi. Selain itu, digunakan benih jagung unggul yang memiliki daya tumbuh tinggi dan tahan terhadap kondisi lokal. Semua perlakuan diaplikasikan sesuai dosis

rekомендasi yang telah ditentukan berdasarkan kandungan nutrisi tanah awal.

Pengukuran parameter pertumbuhan tanaman dilakukan secara berkala setiap dua minggu. Parameter yang diamati meliputi tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar, biomassa kering, dan hasil panen. Selain itu, kualitas hasil panen juga dianalisis, termasuk kadar protein, kadar pati, dan kandungan mineral. Pengukuran ini bertujuan untuk menilai secara komprehensif pengaruh nanoteknologi terhadap produktivitas tanaman dan kualitas hasil panen.

Analisis tanah dilakukan sebelum dan setelah perlakuan. Sampel tanah diambil dari kedalaman 0–20 cm dan dianalisis untuk kandungan nitrogen, fosfor, kalium, pH, kapasitas tukar kation, dan kadar bahan organik. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas nanopartikel dalam meningkatkan ketersediaan nutrisi dan memperbaiki sifat kimia serta fisik tanah. Semua pengukuran dilakukan menggunakan metode standar laboratorium pertanian.

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan uji statistik *Analysis of Variance (ANOVA)* untuk mengidentifikasi perbedaan signifikan antara perlakuan. Apabila terdapat perbedaan signifikan, dilakukan uji *Tukey's HSD* untuk mengetahui perbedaan spesifik antar perlakuan. Analisis ini bertujuan memastikan bahwa hasil yang diperoleh bukan terjadi secara kebetulan, tetapi menunjukkan pengaruh nyata dari aplikasi nanoteknologi terhadap tanah dan tanaman.

Selain pengukuran kuantitatif, penelitian juga dilakukan pengamatan kualitatif terhadap kondisi tanah dan tanaman. Pengamatan meliputi perubahan warna daun, gejala kekurangan hara, serta kejadian stres lingkungan. Informasi kualitatif ini berguna untuk mendukung data kuantitatif dan memberikan gambaran menyeluruh mengenai efektivitas nanoteknologi dalam praktik pertanian.

Seluruh prosedur penelitian dilaksanakan dengan memperhatikan prinsip keberlanjutan dan keamanan lingkungan. Penggunaan nanopartikel dikontrol agar dosis tidak berlebihan dan limbah diolah sesuai protokol laboratorium. Dengan metodologi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan data valid dan akurat mengenai peran nanoteknologi dalam meningkatkan nutrisi tanah dan produktivitas pertanian, sekaligus menjadi referensi bagi pengembangan pertanian modern yang efisien dan ramah lingkungan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa aplikasi nanoteknologi memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan tanaman jagung dibandingkan pupuk



konvensional. Tanaman yang diberi nanopupuk nitrogen, fosfor, dan kalium menunjukkan tinggi tanaman lebih signifikan, jumlah daun lebih banyak, serta panjang akar lebih optimal. Hal ini mengindikasikan bahwa nanopartikel mampu meningkatkan efisiensi penyerapan nutrisi oleh tanaman, sehingga mendukung pertumbuhan vegetatif yang lebih baik.

Analisis kandungan nutrisi tanah sebelum dan sesudah perlakuan menunjukkan peningkatan signifikan pada unsur nitrogen, fosfor, dan kalium. Nanopartikel berhasil menstabilkan pH tanah dan meningkatkan kapasitas tukar kation, sehingga tanah menjadi lebih subur dan siap mendukung pertumbuhan tanaman. Perbaikan sifat kimia dan fisik tanah ini sejalan dengan temuan sebelumnya yang menyatakan bahwa nanopartikel dapat memperbaiki struktur tanah dan memperkuat ketersediaan nutrisi (Mishra & Tripathi, 2020).

Produktivitas tanaman juga meningkat secara nyata. Hasil panen tanaman yang menerima perlakuan nanoteknologi lebih tinggi dibandingkan kontrol. Biomassa kering dan berat biji jagung menunjukkan peningkatan hingga 20–25% pada perlakuan nanopupuk, menandakan bahwa nutrisi yang tersedia lebih optimal diserap oleh tanaman. Peningkatan produktivitas ini mendukung konsep pertanian presisi yang efisien dan berkelanjutan (Khot et al., 2012).

Selain kuantitas hasil, kualitas panen juga mengalami peningkatan. Kandungan protein, pati, dan mineral pada biji jagung yang diberi nanopupuk lebih tinggi dibandingkan kontrol. Hal ini menunjukkan bahwa nanoteknologi tidak hanya meningkatkan pertumbuhan, tetapi juga memperbaiki nilai gizi tanaman. Peningkatan kualitas ini penting untuk mendukung ketahanan pangan yang lebih baik dan memperkaya nilai nutrisi bagi konsumen.

Pengamatan kualitatif terhadap kondisi tanaman menunjukkan bahwa tanaman yang diberi nanoteknologi lebih tahan terhadap stres lingkungan. Daun lebih hijau, minim gejala kekurangan hara, dan pertumbuhan lebih seragam. Fenomena ini mengindikasikan bahwa nanopartikel dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap faktor abiotik, seperti fluktuasi kelembapan dan tekanan lingkungan lainnya (Raliya & Tarafdar, 2013).

Pemanfaatan nanosensor dalam penelitian ini juga memberikan data real-time mengenai kondisi tanah dan tanaman. Sensor mendeteksi kadar nutrisi secara akurat, sehingga aplikasi pupuk dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanaman. Pendekatan ini mengurangi pemborosan pupuk, meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan, sejalan dengan prinsip pertanian berkelanjutan.

Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan bahwa nanoteknologi memiliki potensi besar dalam meningkatkan produktivitas dan kualitas tanaman, sekaligus memperbaiki nutrisi tanah. Meskipun demikian, penerapan nanoteknologi harus memperhatikan dosis dan keamanan lingkungan agar dampak jangka panjang terhadap ekosistem tanah tetap terkontrol. Temuan ini membuka peluang pengembangan pertanian modern yang efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan nanoteknologi dalam pertanian memiliki pengaruh signifikan terhadap pertumbuhan tanaman dan produktivitas lahan. Tanaman yang diberi nanopupuk nitrogen, fosfor, dan kalium menunjukkan peningkatan tinggi tanaman, jumlah daun, dan panjang akar dibandingkan tanaman yang menerima pupuk konvensional. Hal ini menegaskan kemampuan nanopartikel dalam meningkatkan penyerapan nutrisi secara efisien.

Selain meningkatkan pertumbuhan, nanoteknologi juga memperbaiki kualitas hasil panen. Kandungan protein, pati, dan mineral pada tanaman yang menerima perlakuan nanoteknologi lebih tinggi, sehingga nilai gizi hasil panen meningkat. Dengan demikian, nanoteknologi tidak hanya meningkatkan kuantitas, tetapi juga kualitas tanaman, mendukung ketahanan pangan yang lebih baik.

Perbaikan sifat tanah juga terlihat jelas melalui penggunaan nanopartikel. Kandungan nutrisi tanah, kapasitas tukar kation, serta stabilitas pH mengalami peningkatan, sementara struktur tanah menjadi lebih subur dan mampu menahan air lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa nanoteknologi dapat menjadi strategi efektif dalam rehabilitasi tanah terdegradasi.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa nanoteknologi membantu tanaman lebih tahan terhadap stres lingkungan. Tanaman terlihat lebih sehat, daun lebih hijau, dan pertumbuhan lebih seragam, menandakan peningkatan resistensi terhadap kondisi abiotik. Peningkatan ketahanan tanaman ini menjadi nilai tambah penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim.

Meskipun hasilnya positif, penerapan nanoteknologi harus dilakukan dengan kontrol dosis yang tepat dan memperhatikan keamanan lingkungan. Dampak jangka panjang nanopartikel terhadap ekosistem tanah dan organisme tanah masih memerlukan penelitian lebih lanjut agar penggunaannya berkelanjutan dan aman.

Secara keseluruhan, nanoteknologi memiliki potensi besar untuk mendukung pertanian modern yang efisien, produktif, dan ramah lingkungan. Dengan pengembangan



dan penerapan yang tepat, teknologi ini dapat menjadi solusi inovatif dalam meningkatkan nutrisi tanah, produktivitas tanaman, dan kualitas hasil pertanian, sekaligus mendukung praktik pertanian berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

Almutairi, Z. M., & Alharbi, A. (2015). Effect of silver nanoparticles on seed germination of crop plants. *International Journal of Nanotechnology and Applications*, 5(1), 1–8.

Bhattacharyya, A., Mandal, S., Das, S., & Kumar, R. (2021). Nanomaterials for sustainable agriculture. *Nature Sustainability*, 4(5), 1–11.

Chen, Q., Zhang, Y., & Wang, X. (2021). Nanomaterials in agriculture: Opportunities and challenges. *Environmental Science: Nano*, 8(1), 1–16.

Das, S. K., & Dash, G. K. (2013). Nanotechnology: A new horizon in agriculture. *International Journal of Science Innovations and Discoveries*, 3(1), 28–34.

Ditta, A. (2012). How helpful is nanotechnology in agriculture? *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 3(3), 033002.

Gebeshuber, I. C., & Majlis, B. Y. (2010). Biomimetic nanotechnology: A powerful means to address global challenges. *Nanotechnology Reviews*, 1(1), 47–56.

Ghormade, V., Deshpande, M. V., & Paknikar, K. M. (2011). Perspectives for nanobiotechnology enabled protection and nutrition of plants. *Biotechnology Advances*, 29(6), 792–803.

Himel, M. H., Rahman, M. S., & Chowdhury, M. A. (2022). Biomimicry in nanotechnology: A comprehensive review. *Journal of Nanomaterials*, 2022, 1–14.

Kah, M., Beulke, S., Tiede, K., & Hofmann, T. (2019). Nanotechnology in agriculture: Opportunities, toxicological implications, and occupational risks. *Science of the Total Environment*, 648(16), 2903–2913.

Khot, L. R., Sankaran, S., Maja, J. M., Ehsani, R., & Schuster, E. W. (2012). Applications of nanomaterials in agricultural production and crop protection: A review. *Crop Protection*, 35, 64–70.

Kumar, M., Singh, R., & Patel, A. (2025). Nano urea fertilizer and its role in sustainable agriculture. *International Journal of Agricultural Science*, 11(2), 45–53.

Lohar, D., Sharma, R., & Singh, P. (2024). Effect of foliar spray of nano fertilizer on growth characters of Rabi maize. *International Journal of Plant & Soil Science*, 36(4), 273–278.

Manikandan, A., & Subramaniam, S. (2016). Nano-urea: A new approach to enhance nitrogen use efficiency in agriculture. *Frontiers in Plant Science*, 7, 1–8.

Mishra, A., & Tripathi, D. K. (2020). Nanotechnology in agriculture: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 1–16.

Noah, N., & Ndangili, P. (2021). Green synthesis of nanomaterials from sustainable materials for biosensors and drug delivery. *Journal of Nanobiotechnology*, 19(1), 1–14.

Prasad, R., Bhattacharyya, A., & Nguyen, Q. D. (2017). Nanotechnology in sustainable agriculture: Recent developments, challenges, and perspectives. *Frontiers in Microbiology*, 8, 1014.

Rai, M., Ribeiro, C., Mattoso, L., & Duran, N. (2015). Nanotechnologies in food and agriculture. Springer International Publishing.

Raliya, R., & Tarafdar, J. C. (2013). Nanotechnology for sustainable agriculture: Nano-fertilizers for increasing crop nutrition. *Sustainable Agriculture Reviews*, 13, 1–22.

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.

Sharma, P., Bhatt, D., Zaidi, M. G. H., Saradhi, P. P., Khanna, P. K., & Arora, S. (2012). Silver nanoparticle-mediated enhancement in growth and antioxidant status of *Brassica juncea*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 167(8), 2225–2233.

Singh, S., Kumar, P., & Yadav, R. (2023). Advances in nanotechnology for sustainable agriculture: A review. *Agronomy*, 13(1), 1–19.

Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2017). Nanofertilizers for agricultural applications: Prospects and challenges. *Journal of Plant Nutrition*, 40(13), 1925–1939.

Wang, P., Lombi, E., Zhao, F. J., & Kopittke, P. M. (2016). Nanotechnology: A new opportunity in plant sciences. *Trends in Plant Science*, 21(8), 699–712.

Wu, H., Tito, N., & Giraldo, J. P. (2017). Anionic cerium oxide nanoparticles protect plant photosynthesis from abiotic stress by scavenging reactive oxygen species. *ACS Nano*, 11(11), 11283–11297.

Zhang, H., Chen, G., & Guo, Y. (2024). Nanotechnology applications in sustainable agriculture. *Science of the Total Environment*, 752, 141924.



Zhang, W., Ruan, L., & Yin, X. (2019). Nanotechnology and crop improvement: Current status and future perspectives. *Plant Physiology Reports*, 24(3), 257–268.

Zhao, L., Huang, Y., Hu, J., Zhou, H., Adeleye, A. S., & Keller, A. A. (2016). ^1H NMR and GC–MS based metabolomics reveal defense and detoxification mechanism of cucumber plants under nano-Cu stress. *Environmental Science & Technology*, 50(4), 2000–2010.

Zhao, Y., & Wang, Z. (2020). Role of nanomaterials in improving soil fertility and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 199, 104594.

Zia, R., & Yousaf, S. (2021). Application of nanotechnology in sustainable crop production and protection. *Journal of Cleaner Production*, 278, 123801.

Zuo, X., & Li, B. (2020). Nanofertilizers in soil–plant systems. *Soil Science Annual*, 71(2), 149–160.