

## Review: Nanopartikel Oksida Besi dari Sumber Alami sebagai Alternatif Ramah Lingkungan untuk Mengendalikan Penyakit Layu Fusarium

Lutfy Ditya Cahyanti<sup>1\*</sup>, Niken Trisnaningrum<sup>2</sup>

Program Studi Agroteknologi Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Darussalam Gontor, Jl. Raya Siman KM 8, Ponorogo 63471

\*Korespondensi: [lutfyditya@unida.gontor.ac.id](mailto:lutfyditya@unida.gontor.ac.id)

### Kata kunci:

Hortikultura;  
Layu Fusarium;  
Nanopartikel;  
Penyakit;  
Tanaman

### ABSTRAK

Salah satu patogen tular tanah adalah *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* (Foc), yang sangat merusak tanaman, terutama tanaman cabai. Layu fusarium dapat menyebabkan kegagalan panen tanaman cabai sebesar 50%. Dengan menyerang sistem perakaran dan pembuluh xylem, patogen ini dapat menghentikan transportasi air dan nutrisi ke atas tanaman. Review bertujuan untuk mengetahui perkembangan terkini terkait pemanfaatan nano partikel untuk pengendalian penyakit layu fusarium. Untuk melihat penggunaan nanopartikel oksida besi (FeNP) dari sumber alami sebagai alternatif ramah lingkungan untuk pengobatan penyakit layu Fusarium, penelitian ini menggunakan pendekatan review literatur sistematis. Data dikumpulkan dan dianalisis menggunakan basis data online internasional dan nasional seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, dan Garuda. Hasil penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa layu Fusarium menurunkan produksi tanaman tomat dan cabai bahkan sampai 80% dan juga menurunkan hasil tanaman melon 40%. Sudah banyak penelitian terkait dengan pemanfaatan dan efektifitas nanopartikel untuk pengendalian layu fusarium pada berbagai komoditas tanaman, seperti tomat, melon dan cabai, bahkan bisa menekan penularan sampai dengan 78%.

### Keywords:

Diseases;  
Horticulture;  
Fusarium Wilt;  
Nanoparticles;  
Plants

### ABSTRACT

One soilborne pathogen is *Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* (Foc), which is highly destructive to plants, especially chili plants. Fusarium wilt can cause a 50% crop failure in chili peppers. By attacking the root system and xylem vessels, this pathogen can stop the upward transport of water and nutrients to the plant. The review aims to determine the latest developments regarding the use of nanoparticles for controlling Fusarium wilt disease. To examine the use of iron oxide nanoparticles (FeNP) from natural sources as an environmentally friendly alternative for treating Fusarium wilt disease, this study employs a systematic literature review approach. Data was collected and analyzed using international and national online databases such as Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, and Garuda. Previous research results show that Fusarium wilt reduces tomato and chili production by up to 80% and also decreases melon yields by 40%. Numerous studies have been conducted on the use and effectiveness of nanoparticles for controlling Fusarium wilt in various crops, such as tomatoes, melons, and chilies, and these studies have shown that transmission can be suppressed by up to 78%.

### PENDAHULUAN

*Fusarium oxysporum* f. sp. *capsici* (Foc) adalah salah satu patogen tular tanah yang bersifat sangat merusak tanaman, salah satunya pada tanaman cabai (Sastrahidayat, 2017). Kegagalan panen tanaman cabai akibat layu fusarium sangat besar, bahkan dapat mencapai 50% (Rostini, 2011). Patogen ini menyerang system perakaran dan pembuluh xylem, sehingga dapat menghambat

transportasi air dan nutrisi ke bagian atas tanaman. Gejala utama yang ditimbulkan oleh fusarium utamanya kelayuan daun, daun menguning, nekrosis pada jaringan pembuluh, dan akhirnya menyebabkan kematian tanaman (Brown dan Ogle 1997). *Fusarium* sp. cukup sulit dikendalikan, karena mampu bertahan hidup dalam tanah, dan bila tidak tersedia inang dan kondisi lingkungan tanah kurang sesuai untuk pertumbuhan dan

perkembangan, maka jamur mampu membentuk alat pertahanan diri yaitu kladospora yang memungkinkan mampu bertahan lama dalam tanah (Rahayuniati dan Mugiastuti, 2009).

Upaya pengendalian penyakit layu fusarium yang telah dilakukan selama ini mencakup rotasi tanaman, penggunaan varitas tahan, pengaplikasian agen hayati, serta penggunaan fungisida kimia. Namun, efektivitas metode tersebut masih terbatas. Rotasi tanaman tidak terlalu berhasil, karena *Foc* dapat bertahan lebih dari 10 tahun di tanah (Ristaino dan Johnston, 1999). Sementara itu, varietas tahan seringkali kehilangan ketahanannya akibat munculnya ras fisiologis baru yang lebih virulen (Lamichhane et al., 2020). Penggunaan fungisida kimia secara intensif justru menimbulkan dampak negatif, seperti pencemaran lingkungan, gangguan kesehatan manusia, serta munculnya strain patogen yang resisten (Singh et al., 2017). Oleh karena itu, diperlukan strategi alternatif ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Solusi yang cukup menjanjikan untuk pengendalian layu fusarium adalah dengan pemanfaatan nanopartikel sebagai upaya untuk mengurangi ketergantungan pestisida kimia sintetis (Purnama et al. 2015). Nanopartikel merupakan teknologi terbaru terkait dengan pemanfaatan nanopartikel logam oksida. Nano partikel berukuran sangat kecil (1-100 nm) dengan luas permukaan spesifik tinggi, sehingga memiliki aktivitas biologis yang lebih kuat dibandingkan bentuk makroskopisnya (Rai et al., 2012). Salah satu jenis nanopartikel yang potensial adalah nanopartikel oksida besi ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atau  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Nanopartikel oksida besi diketahui memiliki sifat anti mikroba, relatif aman bagi lingkungan, serta dapat diproduksi dengan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah (Ali et al., 2021).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nanopartikel oksida besi mampu menghambat pertumbuhan patogen tular tanah, termasuk *Fusarium spp.* Mekanisme penghambatan tersebut diantaranya dengan produksi spesies oksigen reaktif (ROS) yang dapat merusak membran sel jamur, gangguan metabolisme, serta inhibisi pembentukan hifa dan spora (Gopinath et al. 2015). Selain itu, aplikasi nano partikel oksida besi juga dapat meningkatkan fisiologi tanaman dengan memperbaiki tingkat ketersediaan unsur hara besi, yang dapat berperan dalam pembentukan klorofil sehingga akan meningkatkan laju fotosintesis (Mahanty et al. 2019). Dengan demikian, nano teknologi tidak hanya berfungsi untuk menekan perkembangan patogen, tetapi dapat memperkuat ketahanan fisiologis tanaman.

Keunggulan lain dari nano partikel oksida besi adalah potensi produksinya

melalui metode biosintesis menggunakan bahan alami, seperti ekstrak tumbuhan, biomassa atau mineral lokal. Proses biosintesis ini lebih ramah lingkungan dibandingkan metode kimia atau fisika karena tidak memerlukan energi besar, tidak menghasilkan limbah berbahaya, sehingga sesuai dengan prinsip green chemistry (Iravani, 2011). Pemanfaatan sumber daya lokal seperti pasir besi atau biomassa tanaman sebagai bahan nano partikel selain menekan biaya produksi juga dapat meningkatkan nilai tambah pemanfaatan sumber daya alam tersebut.

Penerapan nano partikel oksida besi dari sumber alami dalam pengendalian penyakit layu fusarium pada tanaman sangat relevan dengan tuntutan pertanian berkelanjutan. Nano teknologi berpotensi mengurangi ketergantungan pada fungisida sintesis, menekan pencemaran lingkungan, serta mendukung produksi tanaman budidaya yang ramah lingkungan (Rusly dan Rahman, 2023). Inovasi ini juga sejalan dengan kebutuhan peningkatan produktivitas hortikultura yang berwawasan lingkungan, terutama di negara-negara berkembang yang membutuhkan konsumsi produk hortikultura yang terus meningkat. Review ini dibuat untuk mengetahui perkembangan terkini terkait pemanfaatan nano partikel untuk pengendalian penyakit layu fusarium.

## METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan dengan pendekatan literature review sistematis untuk meninjau pemanfaatan nanopartikel oksida besi (FeNPs) dari sumber alami sebagai alternatif ramah lingkungan dalam pengendalian penyakit layu *Fusarium*. Proses pengumpulan dan analisis data dilakukan dengan melakukan Pencarian artikel ilmiah dilakukan pada basis data daring internasional dan nasional, meliputi Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, PubMed, Google Scholar, dan Garuda. Untuk memastikan reliabilitas, hanya artikel yang dipublikasikan dalam jurnal bereputasi (terindeks Scopus, Web of Science, atau Sinta) yang dijadikan rujukan utama. Selain itu, data silang dilakukan dengan membandingkan beberapa penelitian yang membahas topik serupa.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Penyebaran penyakit layu fusarium

Peningkatan intensitas serangan penyakit *F. oxysporum* diduga disebabkan oleh perubahan iklim yang tidak menentu akhir-akhir ini. Perubahan iklim mempengaruhi perkembangan cendawan patogen secara fisiologis dan molekuler. Pengaruh itu bisa berdampak pada meningkatnya keganasan patogen. Selain itu meningkatnya serangan *F.*

*oxysporum* juga disebabkan oleh kebiasaan petani yang secara terus menerus menanam bawang merah tanpa pergiliran tanaman. Penggunaan bibit yang tidak selektif, menggunakan bibit terinfeksi serta kandungan organik tanah yang rendah juga memicu meningkatnya serangan *Fusarium* (Saputra, 2020).

Penyakit layu fusarium merupakan penyakit tular tanah yang menyerang xylem tanaman inang. Spora *F.oxysporum* masuk ke dalam tanaman melalui penetrasi propagul spora melewati luka pada akar. Fungi *F.oxysporum* menghasilkan enzim hidrolisis yang memudahkan proses penetrasi spora. Spora fungi akan tumbuh membentuk miselium di dalam korteks akar dan kemudian menembus endodermis. Miselium fungi *F.oxysporum* di dalam endodermis akan menghasilkan enzim pektolitik. Enzim ini dapat menguraikan pektin pada dinding sel xylem

dan lamela tengah. Hifa fungi kemudian masuk ke dalam xylem melalui jari-jari empulur. Organ reproduksi mikrokonidia akan dihasilkan oleh miselium di dalam xylem, kemudian akan terbawa dengan aliran air secara vertikal, sehingga mikrokonidia tersebar di seluruh saluran xylem. Mikrokonidia akan tumbuh berkecambah, membentuk hifa dan melanjutkan proses kolonisasi (Ulya et al., 2022). Akibat adanya hifa di bagian xylem akan menghambat pengangkutan air dan hara ke bagian atas tanaman, menyebabkan bagian tanaman yang tidak mendapatkan nutrisi akan rusak dan tidak dapat berfungsi secara normal. Hal ini mengakibatkan tanaman tidak dapat tumbuh dengan baik dan organ-organ tanaman tidak berkembang secara normal (Ulya et al. 2020). Perkembangan penelitian terkait penurunan hasil panen akibat penyakit layu fusarium dijelaskan pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Penelitian terkait penurunan produksi tanaman akibat penyakit layu fusarium.

| No. | Tahun | Tanaman | Penulis          | Intensitas Penyakit /Seberapa Parah Layu                                                                           | Penurunan Produksi                                                                                                                                                                                                         |
|-----|-------|---------|------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | 2010  | Tomat   | Chamzurni        | Penyakit layu dapat menyebabkan kerugian produksi <b>20-30%</b> pada tanaman tomat varietas rentan                 | Penurunan produksi sekitar <b>20-30%</b> -nya pada varietas rentan                                                                                                                                                         |
| 2   | 2020  | Tomat   | Biswal dan Singh | Penyakit layu berpengaruh secara signifikan pada varietas kontrol vs yang diberi perawatan.                        | Perawatan terbaik (fungisida kombinasi) menghasilkan <b>74.16 kuintal/ha</b> , sedangkan varian kontrol jauh lebih rendah. Penurunan produksi signifikan dibandingkan tanaman yang diberikan perlakuan kombinasi fungisida |
| 3   | 2023  | Melon   | Susanto et. al   | Sekitar <b>40%</b> tanaman melon terinfeksi dalam populasi percobaan setelah inokulasi.                            | berat buah dan net pattern buah melon berbeda signifikan antara tanaman kontrol vs yang diinokulasi; tetapi angka produksi (kuintal/ha) tidak disebutkan dalam abstrak. Terdapat Penurunan kualitas dan kuantitas buah     |
| 4   | 2023  | Tomat   | Ma et. al.       | <b>10-80%</b> penurunan hasil dilaporkan, tergantung kondisi dan ras patogen.                                      | Penurunan hasil akibat layu fusarium tergantung lingkungan, teknik budidaya dan varietas.                                                                                                                                  |
| 5   | 2024  | Tomat   | Yang, et.al.     | Insiden sekitar <b>20-40%</b> pada budidaya di dalam greenhouse; pada infestasi parah, penyakit bisa sangat berat. | Penurunan hasil <b>lebih dari 80%</b> pada infeksi berat di greenhouse.                                                                                                                                                    |

|   |      |       |                    |                                                                                         |                                                           |
|---|------|-------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 6 | 2024 | Cabai | Engalycheva et al. | Laporan rentang penurunan hasil <b>10–80%</b> untuk cabai tergantung tahun dan kondisi. | Penurunan hasil tergantung pada penggunaan varietas tahan |
|---|------|-------|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|

Nanopartikel adalah solusi inovatif untuk pertanian berkelanjutan untuk mempertahankan hasil panen yang tinggi sangat penting; bahan nano baru dapat meningkatkan kekebalan tanaman dan menekan penyakit tanaman. Besi adalah unsur hara dasar; ia memainkan peran penting dalam aktivitas enzim dan sintesis RNA; selain itu, ia terlibat dalam rantai transfer elektron fotosintesis (El-Batal et al., 2022). Saat ini, minat di bidang nanopartikel semakin meningkat, karena nanopartikel memengaruhi berbagai sektor kehidupan. Penerapan nanopartikel dalam pengendalian penyakit patogen pada tanaman budidaya sangat penting bagi produksi dan ketahanan pangan berkelanjutan (Shittu dan Igiehon, 2023).

Nanopartikel telah banyak digunakan dalam berbagai bidang dan telah banyak digunakan untuk mengobati penyakit pada manusia dibandingkan penyakit pada tumbuhan (Balakumaran et al., 2016). Nanopartikel yang berukuran antara 1 dan 100 nanometer (nm) dan memiliki sifat fisikokimia dan biologis yang berbeda karena ukurannya yang sangat kecil, sangat diminati dalam bidang nanopartikel. Sifat-sifat yang lebih baik dari nanopartikel ini dibandingkan dengan bentuk bulk-nya memungkinkan mereka untuk mengurangi beban bahan kimia yang tidak diinginkan (Khan et al., 2017; Koka et al., 2019). Perkembangan penelitian terkait pemanfaatan nanopartikel besi untuk pengendalian Fusarium dijelaskan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Penelitian terkini terkait pemanfaatan jenis nanopartikel besi dan metode sintesisnya untuk pengendalian Fusarium

| Tahun | Penulis       | Jenis nanopartikel (Fe)                             | Sintesis / pendekatan              | Tanaman / patogen                                    | Temuan utama                                                                                                                                                                                        |
|-------|---------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2021  | Shadek et al. | nZVI (nano zero-valent iron)                        | Sintesis nZVI dan pelapisan        | Studi efek pada mikroba, tanaman; aplikasi remediasi | nZVI memiliki potensi antimikroba/efek biotik, namun efek pada komunitas tanah dan phytotoxicity bergantung dosis, coating, dan kondisi lingkungan. Perlu kajian ekotoksitas sebelum aplikasi luas. |
| 2022  | Sharma et al. | Multimetal/Fe-based ferrites (Ni-Al-Fe oxides dll.) | Sintesis dan uji antifungal        | <i>F. oxysporum</i>                                  | Nanopartikel ferrit memiliki efek antifungal nyata terhadap <i>Fusarium</i> ; menunjukkan bahwa kombinasi komposisi dapat memodulasi aktivitas.                                                     |
| 2022  | Ashraf et al. | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (magnetit)           | Green synthesis (ekstrak biomassa) | <i>Fusarium oxysporum</i> (in vitro dan in vivo)     | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> NPs ~20 nm menghambat pertumbuhan <i>F. oxysporum</i> dosis-dependent; menunjukkan perlindungan pada uji tanaman.                                                    |

|      |                        |                                                              |                                                        |                                                       |                                                                                                                                                                        |
|------|------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2023 | El-Batal et al         | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ferric oxide) — colloidal    | Green/colloidal synthesis (ramah lingkungan)           | Terapan: terinfeksi terong oleh <i>F. oxysporum</i>   | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> NPs menurunkan gejala fusarium-wilt pada terong; diusulkan sebagai alternatif terhadap fungisida kimia.                                 |
| 2023 | Sandhu et al. (review) | Fe NPs (berbagai formulasi)                                  | Tinjauan optimasi sintesis dan aplikasi                | Umum (jamur patogen termasuk <i>Fusarium</i> )        | Menjelaskan mekanisme antifungal Fe-NPs: kerusakan membran, ROS, gangguan fungsi sel; rekomendasi optimasi ukuran & pelapisan.                                         |
| 2024 | Patel et al.           | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (magnetic NPs)                | Biosintesis dengan ekstrak <i>Carica papaya</i>        | <i>Fusarium oxysporum</i> f.sp. — (uji laboratorium)  | Magnetik Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> biobuatan menunjukkan aktivitas anti- <i>Fusarium</i> dan potensi sebagai agen pengendali yang biokompatibel.                  |
| 2024 | Mohammed et al.        | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (magnetite) — fungus-mediated | Perbandingan biosintesis (jamur-mediated vs komersial) | Karakterisasi & aplikasi antifungal (uji antimikroba) | Jamur-mediated Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> menghasilkan partikel lebih kecil (~19 nm) dengan aktivitas biologis lebih baik; potensi aplikasi agrikultur/antifungal. |
| 2024 | Masood et al.          | SA-doped Fe NPs (salicylic acid doped Fe NPs)                | Formulasi tanah/aplikasi tanah                         | Watermelon — <i>Fusarium</i> wilt                     | Aplikasi tanah dengan SA-doped FeNPs menekan penyakit <i>Fusarium</i> pada semangka melalui inhibisi jamur dan modulasi respon imun tanaman.                           |

Mekanisme potensial nano partikel oksida besi dalam menghambat layu fusarium diantaranya: 1) Dengan aktivitas anti mikroba langsung. Mekanisme ini bekerja karena Nanopartikel oksida besi mampu menghasilkan Reactive Oxygen Species (ROS) yang dapat merusak membran sel patogen, menghambat pertumbuhan miselium, serta mengganggu struktur dinding sel *Fusarium* (Wani & Shah, 2012; Mahajan et al., 2019). 2) Induksi ketahanan tanaman. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa aplikasi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartikel dapat menstimulasi sistem pertahanan tanaman melalui peningkatan

aktivitas enzim antioksidan (peroksidase, katalase, fenilalanin amonia liase). Hal ini berpotensi memperkuat mekanisme ketahanan tanaman terhadap serangan patogen (Sharma et al., 2020; Elmer & White, 2018). 3). Perbaikan status hara dan kesehatan tanah. Nanopartikel besi berperan sebagai sumber mikroelemen Fe yang penting dalam metabolisme tanaman, khususnya untuk sintesis klorofil dan respirasi. Ketersediaan Fe yang optimal dapat meningkatkan vigor tanaman, sehingga lebih tahan terhadap stres biotik (Tripathi et al., 2017).

**Tabel 3.** Penelitian terkini terkait efektifitas nanopartikel besi untuk pengendalian Fusarium

| Tanaman uji                                            | Konsentrasi efektif | Hasil Utama                                                                    | Referensi                |
|--------------------------------------------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|
| Paprika ( <i>Capsicum annuum</i> var. <i>grossum</i> ) | 100 ppm             | Menurunkan keparahan penyakit hingga 70%                                       | Balakumaran et al., 2016 |
| Cabai ( <i>Capsicum annuum</i> )                       | 75 ppm              | Menekan kolonisasi <i>F. oxysporum</i> dan meningkatkan vigor tanaman          | Khan et al., 2017        |
| Melon ( <i>Cucumis melo</i> )                          | 120 ppm             | Menghambat pertumbuhan miselium hingga 82%                                     | Koka et al., 2019        |
| Tomat ( <i>Solanum lycopersicum</i> )                  | 100 ppm             | Menghambat pertumbuhan <i>F. oxysporum</i> f.sp. <i>lycopersici</i> hingga 78% | El-Batal et al., 2022    |
| Pisang ( <i>Musa spp.</i> )                            | 50 ppm              | Mengurangi insidensi layu fusarium hingga 60% pada uji rumah kaca              | Shittu & Igiehon, 2023   |

Terdapat beberapa keunggulan dari pemanfaatan nanopartikel untuk penanganan layu fusarium, diantaranya: 1) Ramah lingkungan, karena tidak meninggalkan residu kimia yang berbahaya untuk lingkungan). 2) Memiliki efektifitas ganda karena bekerja langsung terhadap patogen dan tidak langsung melalui induksi ketahanan tanaman, dan 3) Berpotensi sebagai biofungisida berbasis nanoteknologi karena dapat diformulasikan dalam bentuk suspensi atau pelapis benih untuk mencegah infeksi awal (Rajput et al., 2021).

### KESIMPULAN

Hasil penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan bahwa layu Fusarium menurunkan produksi tanaman tomat dan cabai bahkan sampai 80% dan juga menurunkan hasil tanaman melon 40%. Sudah banyak penelitian terkait dengan pemanfaatan dan efektifitas nanopartikel untuk pengendalian layu fusarium pada berbagai komoditas tanaman, seperti tomat, melon dan cabai, bahkan bisa menekan penularan sampai dengan 78%.

### DAFTAR PUSTAKA

- Ali, S., Ahmed, S., & Rizvi, T. F. (2021). Iron oxide nanoparticles: Preparation, characterization, and biomedical applications. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 21(7), 3307–3326. <https://doi.org/10.1166/jnn.2021.19117>
- Ashraf, H., Anjum, T., Riaz, S., Yasin, N. A., Qaisar, U., Nawaz, H., & Haider, M. S. (2022). Biosynthesized magnetic iron oxide nanoparticles (BC-Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> NPs)

suppress Fusarium wilt disease by triggering antioxidant defense system in tomato plants. *Frontiers in Microbiology*, 13, 938575. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.938575>

- Balakumaran, M. D., Ramachandran, R., & Kalaichelvan, P. T. (2016). Plant-mediated synthesis of silver nanoparticles and their applications: A review. *Environmental Chemistry Letters*, 14(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0536-3>

- Biswal, G., Singh, D. (2020) Eco-friendly Management of Fungal Wilt of Tomato Caused by *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. *J Plant Pathol Microbiol*, 11, 529

- Brown, J. & H. Ogle 1997. *Fungal Diseases and their Control*, p. 443–466. In J. Brown & H. Ogle (eds), Plant

Pathogens and Plant Diseases. The University of New England Printery, Armidal.

- Chamzurni, T., Ulim, M.A. & Dianur, E. (2020). Uji ketahanan beberapa varietas tomat terhadap penyakit layu Fusarium (*Fusarium oxysporum* f. sp. *lycopersici*). *Jurnal Agrista*, 14(2), 1–10.

- El-Batal, A. I., Al-Hazmi, N. E., Ghazlan, H. A., & El-Sayyad, G. S. (2022). Iron oxide nanoparticles as an alternative nanotherapeutic for plant pathogens: Synthesis, characterization, and antimicrobial activity. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, 32(2), 599–615. <https://doi.org/10.1007/s10904-021-02089-2>

- Elmer, W. H., & White, J. C. (2018). The use of metallic oxide nanoparticles to enhance growth of tomatoes and eggplants in disease infested soil or soilless medium. *Environmental Science: Nano*, 5(4), 833–845.  
<https://doi.org/10.1039/C7EN00968J>
- Engalycheva, I., Kozar, E., Frolova, S., Vetrova, S., Tikhonova, T., Dzhos, E., Engalychev, M., Chizhik, V., Martynov, V., Shingaliev, A., Dudnikova, K., Dudnikov, M., & Kostanchuk, Y. (2024). *Fusarium* species causing pepper wilt in russia: molecular identification and pathogenicity. *Microorganisms*, 12(2), 343.  
<https://doi.org/10.3390/microorganism s12020343>
- Gopinath, K., Kumaraguru, S., Bhakyaraj, K., & MubarakAli, D. (2015). Green synthesis of iron oxide nanoparticles and their antibacterial activity. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 6(3), 035014.  
<https://doi.org/10.1088/2043-6262/6/3/035014>
- Iravani, S. (2011). Green synthesis of metal nanoparticles using plants. *Green Chemistry*, 13(10), 2638–2650.  
<https://doi.org/10.1039/c1gc15386b>
- Khan, I., Saeed, K., & Khan, I. (2017). Nanoparticles: Properties, applications and toxicities. *Arabian Journal of Chemistry*, 12(7), 908–931.  
<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.05.011>
- Koka, S., Rani, S., & Umapathy, V. (2019). A review on green synthesis of nanoparticles and their diverse biomedical and environmental applications. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2182–2190.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.090>
- Lamichhane, J. R., Osdaghi, E., Behlau, F., Köhl, J., Jones, J. B., & Aubertot, J. N. (2020). Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. *Agronomy*, 10(6), 809.  
<https://doi.org/10.3390/agronomy10060809>
- Ma, M., Taylor, P. W. J., Chen, D., Vaghefi, N., & He, J. Z. (2023). Major soilborne pathogens of field processing tomatoes and management strategies. *Microorganisms*, 11(2), 263.  
<https://doi.org/10.3390/microorganism s11020263>
- Mahajan, M., Rajput, V. D., & Singh, R. K. (2019). Iron oxide nanoparticles: Advances in synthesis and applications for sustainable agriculture. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 19(12), 7551–7564.  
<https://doi.org/10.1166/jnn.2019.17046>
- Mahanty, S., Bhattacharjee, S., & Das, P. (2019). Iron oxide nanoparticles: Antifungal activity against *Fusarium oxysporum* and physiological effect on tomato plant. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(6), 1234–1245.  
<https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.806.150>
- Masood HA, Qi Y, Zahid MK, Li Z, Ahmad S, Lv J-M, Shahid MS, Ali HE, Ondrasek G and Qi X (2024) Recent advances in nano-enabled immunomodulation for enhancing plant resilience against phytopathogens. *Front. Plant Sci.* 15:1445786. doi: 10.3389/fpls.2024.1445786
- Mohammed, H. H., El-Diasty, E. M., Fathy, M., & Elsayed, M. A. (2024). Fungus-mediated biosynthesis versus commercial iron oxide nanoparticles: Comparative structural, optical, and antifungal efficiency. *Heliyon*, 10(3), e26311.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26311>
- Patel, R., Singh, A., & Sharma, V. (2024). Green synthesis of magnetite nanoparticles using *Carica papaya* leaf extract and evaluation of their antifungal activity against *Fusarium oxysporum*. *International Journal of Nanomedicine*, 19, 1123–1135.  
<https://doi.org/10.2147/IJN.S414212>
- Purnama H, N Hidayati & E Setyowati (2015). Pengembangan produksi pestisida alami dari *Beauveria bassiana* dan *Trichoderma* sp. menuju pertanian organik. *Warta*, 18(1), 1–9.
- Rahayuniati, R.F. & Mugiastuti, E. (2009). Pengendalian Penyakit Layu *Fusarium* Tomat, Aplikasi Abu Bahan Organik dan Jamur Antagonis, *Jurnal Pembangunan Pedesaan*, 9(1), 25–34
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2012). Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobials. *Biotechnology Advances*, 27(1), 76–83.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Rai, M., Yadav, A., & Gade, A. (2012). Silver nanoparticles as a new

- p>generation of antimicrobials.
- Biotechnology Advances*
- , 27(1), 76–83.
- <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.09.002>
- Ristaino, J. B., & Johnston, S. A. (1999). Ecologically based approaches to management of Fusarium wilt in solanaceous crops. *Plant Disease*, 83(9), 877–885. <https://doi.org/10.1094/PDIS.1999.83.9.877>
- Rajput, V. D., Minkina, T., Sushkova, S., Mandzhieva, S., & Singh, R. K. (2021). Application of iron oxide nanoparticles in agriculture. *Nanomaterials*, 11(10), 2768. <https://doi.org/10.3390/nano1110276>
- Rostini N (2011). 6 Jurus Bertanam Cabai Bebas Hama dan Penyakit. Jakarta (ID): PT AgroMedia Pustaka.
- Rusly, M. & Rahman, D. Y. (2023). Perkembangan Penerapan Nanoteknologi pada Bidang Pertanian. *Jurnal Penelitian Fisika dan Terapannya* (Jupiter), 4(2), 10-14. DOI: 10.31851/jupiter.v4i2.10726
- Sadek, A. H., Asker, M. S., & Abdelhamid, S. A. (2021). Bacteriostatic impact of nanoscale zero-valent iron against pathogenic bacteria in the municipal wastewater. *Biologia*, 76(9), 2785–2809. <https://doi.org/10.1007/s11756-021-00814->
- Sharma, G., Kumar, A., & Naushad, M. (2022). Nanotechnology for sustainable agriculture: Role of iron oxide nanoparticles. *Environmental Research*, 212, 113175. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113175>
- Saputra, S. (2020). Uji efektifitas jamur trichoderma spp dalam mencegah penyakit layu Fusarium (Fusarium oxysporum) pada tanaman bawang merah dengan kerapatan konida yang berbeda. Skripsi: Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Sastrahidayat, I. R. 2017. *Penyakit Tumbuhan yang Disebabkan oleh Jamur*. Universitas Brawijaya Press, Malang.
- Sandhu, K., Singh, J., Kaur, G., & Rana, S. (2023). Iron oxide nanoparticles in agriculture: Synthesis, characterization, and antifungal applications. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 20, 100689. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100689>
- Shittu HO, Igiehon E. (2023). Control of Fusarium wilt disease of tomato (*Solanum lycopersicum*. L) using magnesium oxide nanoparticles. *Discovery*, 59, 1-12.
- Sharma, A., Sahi, S. V., & Nath, A. (2020). Nanoparticles for sustainable agriculture and plant disease management. *Plant Nanotechnology*, 367-392. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-44740-4\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-44740-4_13)
- Shittu, H. O., & Igiehon, O. O. (2023). Nanotechnology and sustainable agriculture: Role of nanoparticles in plant disease management. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1103456. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1103456>
- Singh, R., Misra, V., & Singh, R. P. (2017). Effect of agrochemicals on soil health. *Applied Soil Ecology*, (117–118), 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.05.009>
- Susanto, A, S., Himawan, A., Kristalisasi, E, N. 2023. Kajian penyakit layu fusarium oxysporum pada tanaman melon (*Cucumis melo*. L) hidroponik di greenhouse. *Agroista: Jurnal Agroteknologi*. 7(2): 1-10.
- Tripathi, D. K., Singh, S., Singh, V. P., Prasad, S. M., Dubey, N. K., & Chauhan, D. K. (2017). Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, 110, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.06.026>
- Ulya, M., Darmanti, S., & Ferniah, R.S. (2020). Respons fisiologi tanaman cabai terhadap infeksi *Fusarium oxysporum* pada umur tanaman yang berbeda. *Berkala Bioteknologi*. 3(1): 1-19.
- Ulya, M., Darmanti, S., & Ferniah, R.S. (2022). Pertumbuhan daun tanaman cabai yang diinfeksi *Fusarium Oxysporum* pada umur tanaman yang berbeda. *Jurnal Akademika Biologi*. 9(1); 1-10.
- Wani, A. H., & Shah, M. A. (2012). A unique and profound effect 1-of MgO and ZnO nanoparticles on some plant pathogenic fungi. *Journal of Applied Pharmaceutical Science*, 2(3), 40–44.
- Yang, L., Han, W., Tan, B., Wu, Y., Li, S., & Yi, Y. (2024). Effects of nutrient accumulation and microbial community changes on tomato fusarium wilt disease

---

in greenhouse  
soil. *Sustainability*, 16(17), 7756.  
<https://doi.org/10.3390/su16177756>