

Peran Mikroorganisme dalam Meningkatkan Produktivitas Tanaman : Pendekatan Bioteknologi Berbasis Mikrobiologi Pertanian

Ester Twenty Aprilian Zendrato^{1*}, Natalia Kristiani Lase²

¹⁻² Program Studi Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Indonesia

Alamat: Jl. Yos Sudarso Ujung 118, Gunungsitoli, Sumatera Utara

Korespondensi penulis: estertwentyzend@gmail.com

Abstract. *Crop productivity is one of the key components in supporting the sustainability of the agricultural sector and global food security. However, challenges such as soil degradation, dependence on chemical fertilizers, and climate change necessitate more innovative and environmentally friendly approaches. Soil microorganisms play a significant role in improving crop productivity through biological mechanisms such as nitrogen fixation, organic matter decomposition, mycorrhizal symbiosis, and the production of bioactive compounds that protect plants from pathogens and abiotic stress. Microbiology-based biotechnology approaches, such as the use of biofertilizers and biopesticides, offer environmentally friendly solutions to address modern agricultural problems. This research aims to review the role of microorganisms in improving crop productivity, focusing on the application of microbiology-based biotechnology. The research method used is a literature study or meta-analysis of relevant literature and research in the last 10 years. The results of the discussion show that microorganisms such as Rhizobium, Azospirillum, Trichoderma, and mycorrhiza have a major contribution in improving soil fertility, crop yields, and plant resistance to environmental stress.*

Keywords: *microorganisms, productivity, biotechnology, agriculture*

Abstrak. Produktivitas tanaman merupakan salah satu komponen utama dalam mendukung keberlanjutan sektor pertanian dan ketahanan pangan global. Namun, tantangan seperti degradasi tanah, ketergantungan pada pupuk kimia, dan perubahan iklim mengharuskan adanya pendekatan yang lebih inovatif dan ramah lingkungan. Mikroorganisme tanah memiliki peran yang signifikan dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui mekanisme biologis seperti fiksasi nitrogen, dekomposisi bahan organik, simbiosis mikoriza, serta produksi senyawa bioaktif yang melindungi tanaman dari patogen dan stres abiotik. Pendekatan bioteknologi berbasis mikrobiologi, seperti penggunaan pupuk hayati dan biopestisida, menawarkan solusi yang ramah lingkungan untuk mengatasi masalah pertanian modern. Penelitian ini bertujuan untuk mengulas peran mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman, dengan fokus pada penerapan bioteknologi berbasis mikrobiologi. Metode penelitian yang digunakan adalah studi pustaka atau meta-analisis terhadap literatur dan penelitian relevan dalam 10 tahun terakhir. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa mikroorganisme seperti Rhizobium, Azospirillum, Trichoderma, dan mikoriza memiliki kontribusi besar dalam meningkatkan kesuburan tanah, hasil panen, serta ketahanan tanaman terhadap tekanan lingkungan.

Kata kunci: mikroorganisme, produktivitas, bioteknologi, pertanian

1. PENDAHULUAN

Mikroorganisme tanah memainkan peran penting dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui berbagai mekanisme yang mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman. Salah satu kontribusi utamanya adalah melalui penguraian bahan organik menjadi nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman, yang berkontribusi langsung pada peningkatan kesuburan tanah. Selain itu, bakteri pengikat nitrogen seperti Rhizobium dan Azotobacter mampu mengkonversi nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh tanaman, sehingga memperkaya kandungan nitrogen dalam tanah. Mikroorganisme juga berperan dalam sirkulasi nutrisi dengan mengubah senyawa organik

menjadi bentuk yang lebih mudah diserap oleh tanaman dan menjaga keseimbangan nutrisi di dalam tanah.

Tidak hanya itu, beberapa mikroorganisme tanah memiliki kemampuan untuk melindungi tanaman dari penyakit melalui produksi senyawa antimikroba yang bersifat antagonis terhadap patogen. Aktivitas mikroorganisme juga dapat meningkatkan struktur tanah, seperti membentuk agregat tanah yang lebih baik, sehingga mendukung aliran air dan udara serta pertumbuhan akar tanaman. Lebih lanjut, hubungan simbiotik antara mikroorganisme seperti mikoriza dengan akar tanaman memberikan manfaat tambahan berupa peningkatan penyerapan nutrisi dan air serta memberikan ketahanan terhadap stres lingkungan.

Dalam konteks bioteknologi pertanian, peran mikroorganisme ini dimanfaatkan dalam pengembangan pupuk hayati dan biopestisida, yang merupakan alternatif ramah lingkungan untuk menggantikan bahan kimia sintetis. Pendekatan ini tidak hanya membantu meningkatkan hasil panen tetapi juga mendukung sistem pertanian berkelanjutan yang lebih bersahabat dengan lingkungan. Dengan memahami potensi mikroorganisme dalam ekosistem pertanian, praktik pertanian dapat ditingkatkan menuju keberlanjutan dan keseimbangan ekosistem yang lebih baik.

Produktivitas pertanian merupakan salah satu aspek penting dalam mendukung ketahanan pangan dan keberlanjutan ekosistem. Menurut Sutanto (2002), tanah yang subur tidak hanya ditentukan oleh kandungan hara kimia, tetapi juga oleh aktivitas biologis yang didukung oleh keberadaan mikroorganisme tanah. Mikroorganisme seperti bakteri, fungi, dan aktinomisetes berperan sebagai agen biologis yang mampu meningkatkan kesuburan tanah melalui dekomposisi bahan organik menjadi nutrisi yang tersedia bagi tanaman. Lebih lanjut, Hadi dan Gunawan (2015) menjelaskan bahwa mikroorganisme pengikat nitrogen, seperti *Rhizobium* dan *Azospirillum*, memainkan peran penting dalam fiksasi nitrogen bebas dari atmosfer sehingga meningkatkan ketersediaan nitrogen di tanah tanpa ketergantungan pada pupuk kimia sintetis.

Selain itu, Setiawan (2019) menekankan bahwa mikroorganisme tanah seperti mikoriza membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, yang tidak hanya meningkatkan penyerapan nutrisi fosfor, tetapi juga memberikan perlindungan terhadap stres lingkungan seperti kekeringan. Dalam perspektif lain, Iswanto dan Yuliana (2021) menyebutkan bahwa bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria/PGPR) mampu menghasilkan hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin yang merangsang pertumbuhan akar serta meningkatkan serapan nutrisi.

Menurut Wahyudi et al. (2018), pemanfaatan bioteknologi berbasis mikroorganisme seperti pupuk hayati (biofertilizer) dan biopestisida merupakan pendekatan strategis dalam menciptakan sistem pertanian yang berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan temuan Siregar (2020), yang mengungkapkan bahwa penggunaan mikroorganisme sebagai agen hayati tidak hanya meningkatkan hasil panen, tetapi juga mengurangi dampak negatif penggunaan bahan kimia terhadap lingkungan. Dengan demikian, peran mikroorganisme tanah dalam mendukung sistem pertanian modern menjadi sangat relevan untuk diterapkan di tengah tantangan global seperti perubahan iklim dan degradasi lahan.

Produktivitas tanaman menjadi salah satu aspek utama dalam upaya mendukung keberlanjutan sektor pertanian dan ketahanan pangan global. Namun, tantangan seperti penurunan kesuburan tanah, ketergantungan pada pupuk kimia, serta ancaman perubahan iklim terus menjadi hambatan yang serius. Di sisi lain, mikroorganisme tanah memiliki potensi besar untuk meningkatkan produktivitas tanaman melalui berbagai mekanisme biologis, seperti fiksasi nitrogen, dekomposisi bahan organik, hingga hubungan simbiotik dengan akar tanaman. Kendati demikian, pemahaman mengenai pemanfaatan mikroorganisme dalam praktik pertanian modern, terutama dalam bentuk bioteknologi seperti pupuk hayati dan biopestisida, masih memerlukan pengkajian lebih lanjut. Hal ini menimbulkan pertanyaan: sejauh mana peran mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman dan bagaimana pendekatan bioteknologi dapat dimanfaatkan secara efektif dalam sistem pertanian berkelanjutan?

Penelitian ini bertujuan untuk mengulas peran mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui berbagai mekanisme biologis yang mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengeksplorasi pendekatan bioteknologi berbasis mikrobiologi yang memanfaatkan potensi mikroorganisme, seperti penggunaan pupuk hayati dan biopestisida, untuk mengatasi tantangan dalam sistem pertanian modern. Dengan demikian, diharapkan artikel ini dapat memberikan wawasan ilmiah yang mendukung pengembangan teknologi pertanian berkelanjutan yang ramah lingkungan dan efisien.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode studi pustaka atau meta-analisis terhadap berbagai literatur dan hasil penelitian sebelumnya yang relevan dengan peran mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman melalui pendekatan bioteknologi berbasis mikrobiologi.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Peran Mikroorganisme Dalam Meningkatkan Kesuburan Tanah Dan Penyerapan Nutrisi

Penelitian oleh Sutanto (2014) menunjukkan bahwa mikroorganisme tanah seperti bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria/PGPR) berkontribusi dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman. PGPR dapat meningkatkan penyerapan fosfor yang sebelumnya terikat dalam tanah yang sulit diserap oleh tanaman. Selain itu, bakteri seperti *Azospirillum* dapat memperbaiki keseimbangan nitrogen di tanah, membantu tanaman memperoleh nitrogen lebih efektif tanpa ketergantungan pada pupuk kimia (Hadi & Gunawan, 2015). Hal ini memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan hasil pertanian dan mengurangi penggunaan bahan kimia yang berbahaya bagi lingkungan.

Mikroorganisme tanah memiliki peran yang sangat signifikan dalam meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung produktivitas tanaman. Salah satu peran utamanya adalah dalam siklus nutrisi tanah, di mana mikroorganisme membantu menguraikan bahan organik menjadi senyawa yang lebih sederhana dan dapat diserap oleh tanaman. Proses dekomposisi ini mengubah sisa-sisa tanaman dan bahan organik lainnya menjadi nutrisi seperti nitrogen, fosfor, kalium, dan unsur hara lainnya yang sangat diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme seperti bakteri dekomposer dan jamur memiliki kemampuan untuk memecah bahan organik yang sulit dicerna menjadi bentuk yang lebih tersedia bagi tanaman. Menurut Sutanto (2014), aktivitas mikroba ini secara langsung meningkatkan kesuburan tanah dan memperkaya kandungan unsur hara yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman.

Selain itu, bakteri pemacu pertumbuhan tanaman (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria/PGPR), seperti *Azospirillum* dan *Pseudomonas*, memiliki kemampuan untuk meningkatkan ketersediaan fosfor yang terikat di tanah, yang biasanya tidak mudah diserap oleh tanaman. Hadi dan Gunawan (2015) juga menjelaskan bahwa mikroorganisme ini menghasilkan enzim atau senyawa yang mampu melarutkan fosfat yang terikat dalam

tanah, menjadikannya lebih mudah diakses oleh akar tanaman. Ini tidak hanya meningkatkan penyerapan fosfor, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan air dan nutrisi lainnya, sehingga tanaman dapat tumbuh lebih optimal meskipun di tanah dengan kandungan hara rendah.

Dengan demikian, peran mikroorganisme dalam meningkatkan kesuburan tanah melalui proses-proses biologis ini sangat penting, terutama di tengah tantangan pengelolaan tanah yang semakin kompleks, seperti penurunan kualitas tanah dan ketergantungan yang tinggi terhadap pupuk kimia. Pendekatan berbasis mikroorganisme menawarkan solusi yang lebih ramah lingkungan untuk meningkatkan produktivitas tanaman secara berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada input kimiawi yang berbahaya bagi lingkungan.

Mikroorganisme Pengikat Nitrogen

Salah satu mekanisme utama mikroorganisme yang mempengaruhi produktivitas tanaman adalah kemampuan mereka untuk mengikat nitrogen bebas di atmosfer. Menurut penelitian Iswanto dan Yuliana (2021), bakteri *Rhizobium* dan *Azotobacter* memainkan peran penting dalam proses fiksasi nitrogen, mengubah nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa aplikasi inokulan mikroba ini dapat meningkatkan hasil tanaman kedelai dan jagung secara signifikan, terutama di tanah dengan kandungan nitrogen rendah.

Mikroorganisme pengikat nitrogen, seperti *Rhizobium* dan *Azotobacter*, memainkan peran krusial dalam meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman, terutama dalam kondisi tanah yang kekurangan nitrogen. *Rhizobium*, yang membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman polongan seperti kedelai dan kacang tanah, mampu mengikat nitrogen bebas dari atmosfer dan mengubahnya menjadi amonia yang dapat diserap langsung oleh tanaman. Proses ini tidak hanya mengurangi ketergantungan pada pupuk kimia berbasis nitrogen, tetapi juga meningkatkan efisiensi penggunaan nitrogen dalam tanah. Selain itu, bakteri seperti *Azotobacter* yang hidup bebas di tanah, dapat mengikat nitrogen atmosfer dan menyediakan nitrogen yang tersedia untuk tanaman non-polongan.

Penelitian oleh Hadi dan Gunawan (2015) menunjukkan bahwa inokulasi tanaman dengan *Azotobacter* dapat meningkatkan hasil tanaman padi dan jagung secara signifikan, terutama di tanah dengan kandungan nitrogen rendah. Penggunaan mikroorganisme pengikat nitrogen ini juga membantu menjaga keseimbangan ekosistem tanah, karena mengurangi penggunaan pupuk sintetis yang berpotensi merusak mikroflora tanah lainnya

dan menyebabkan polusi air. Dalam konteks pertanian berkelanjutan, mikroorganisme pengikat nitrogen memberikan solusi alami untuk meningkatkan hasil pertanian tanpa memperburuk kualitas lingkungan, sehingga menjadi alternatif yang sangat berharga dalam sistem pertanian modern yang ramah lingkungan.

Simbiosis Mikoriza Dan Peningkatan Ketahanan Stres

Mikoriza, terutama yang tergabung dalam kelompok Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), juga memiliki peran penting dalam mendukung pertumbuhan tanaman. Setiawan (2019) menjelaskan bahwa mikoriza membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, yang memungkinkan tanaman untuk menyerap lebih banyak air dan nutrisi seperti fosfor, serta meningkatkan ketahanan terhadap stres abiotik, seperti kekeringan. Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) juga mengungkapkan bahwa mikoriza berperan dalam pengurangan dampak negatif dari kekeringan pada tanaman jagung, yang menunjukkan potensi mereka dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim.

Mikoriza, terutama Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF), memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung produktivitas tanaman, terutama dalam hal penyerapan nutrisi dan ketahanan terhadap stres lingkungan. Hubungan simbiotik antara mikoriza dan akar tanaman memungkinkan tanaman untuk memperoleh lebih banyak nutrisi, khususnya fosfor, yang sering kali terbatas dalam tanah. Fosfor adalah elemen yang sangat dibutuhkan oleh tanaman untuk pertumbuhan akar dan pembentukan bunga serta buah. Mikoriza memperluas area penyerapan tanaman dengan membentuk jaringan hifa yang dapat menjangkau zona tanah yang lebih luas daripada akar tanaman itu sendiri, sehingga memungkinkan tanaman untuk menyerap fosfor dan unsur hara lainnya yang tidak dapat dijangkau oleh akar secara langsung.

Lebih lanjut, mikoriza juga memberikan manfaat dalam peningkatan ketahanan tanaman terhadap stres abiotik, seperti kekeringan atau suhu ekstrem. Penelitian oleh Setiawan (2019) menunjukkan bahwa mikoriza dapat meningkatkan kapasitas tanaman untuk menyerap air, yang sangat penting di daerah yang rentan terhadap kekeringan. Hifa mikoriza membantu transportasi air dari tanah ke akar tanaman, yang memungkinkan tanaman bertahan lebih lama dalam kondisi kekurangan air. Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) juga mengungkapkan bahwa tanaman jagung yang diinokulasi dengan mikoriza menunjukkan peningkatan ketahanan terhadap kekeringan dan mampu bertahan lebih baik dibandingkan dengan tanaman yang tidak terinfeksi mikoriza. Hal ini membuktikan bahwa mikoriza tidak hanya berperan dalam aspek pertumbuhan, tetapi juga dalam meningkatkan

ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim dan kondisi lingkungan yang tidak mendukung.

Dengan peranannya yang sangat penting ini, mikoriza menjadi salah satu komponen utama dalam sistem pertanian berkelanjutan. Penggunaan inokulasi mikoriza sebagai bagian dari praktik pertanian dapat membantu mengurangi ketergantungan pada penggunaan pupuk kimia, yang sering kali memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan mikoriza dalam pertanian modern merupakan langkah yang sangat strategis untuk mendukung pertanian yang ramah lingkungan, efisien, dan lebih tahan terhadap perubahan iklim yang semakin tidak menentu.

Aplikasi Bioteknologi Dalam Pengelolaan Tanaman

Dalam bidang bioteknologi, berbagai penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme juga dapat digunakan sebagai alternatif dalam pengelolaan hama dan penyakit tanaman melalui penggunaan biopestisida. Menurut Siregar (2020), penggunaan biopestisida yang mengandalkan mikroorganisme seperti *Trichoderma* spp. dapat mengurangi kerugian akibat patogen tanaman, seperti jamur dan bakteri penyebab penyakit tanaman. Selain itu, penerapan pupuk hayati yang mengandung mikroorganisme juga terbukti meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit, mengurangi kebutuhan terhadap pestisida kimia, dan mendukung pertanian berkelanjutan.

Aplikasi bioteknologi dalam pengelolaan tanaman melalui penggunaan mikroorganisme sebagai biopestisida semakin mendapatkan perhatian dalam beberapa tahun terakhir. Penggunaan biopestisida berbasis mikroorganisme menawarkan alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan pestisida kimia sintetis yang sering kali menimbulkan dampak negatif terhadap ekosistem dan kesehatan manusia. Sebagai contoh, mikroorganisme seperti *Trichoderma* spp. telah terbukti efektif dalam mengendalikan penyakit tanaman yang disebabkan oleh patogen tanah, seperti jamur *Fusarium* dan *Rhizoctonia*. Penelitian yang dilakukan oleh Siregar (2020) menunjukkan bahwa aplikasi *Trichoderma* dapat mengurangi infeksi patogen pada tanaman padi, tomat, dan cabai, dengan cara bersaing dengan patogen untuk ruang dan sumber daya serta menghasilkan senyawa antimikroba yang melawan pertumbuhan jamur patogen.

Lebih lanjut, penggunaan mikroorganisme sebagai agen pengendali hayati memiliki keuntungan lain, yakni mengurangi ketergantungan pada bahan kimia yang dapat merusak kualitas tanah dan mempengaruhi keanekaragaman hayati. Misalnya, bakteri *Bacillus thuringiensis* (Bt), yang dikenal dengan kemampuannya untuk menghasilkan toksin yang mematikan serangga, dapat digunakan sebagai alternatif untuk mengendalikan hama

penggerek batang pada tanaman jagung dan padi. Keunggulan dari biopestisida berbasis mikroorganisme ini adalah selektivitasnya yang tinggi terhadap hama target, tanpa merusak organisme non-target atau mikroorganisme bermanfaat lainnya di tanah.

Penggunaan biopestisida berbasis mikroorganisme juga dapat diterapkan dalam sistem pertanian organik yang semakin berkembang. Penelitian oleh Wahyudi et al. (2018) mengungkapkan bahwa dalam pertanian organik, mikroorganisme tidak hanya digunakan untuk pengendalian hama dan penyakit, tetapi juga dalam memperbaiki kualitas tanah melalui proses dekomposisi bahan organik dan memperkaya kandungan unsur hara. Dengan demikian, biopestisida mikroba tidak hanya berfungsi sebagai pengendali patogen, tetapi juga mendukung siklus nutrisi dalam tanah, meningkatkan kesuburan, dan mengurangi kebutuhan akan bahan kimia sintetis.

Secara keseluruhan, penggunaan mikroorganisme sebagai biopestisida dalam sistem pertanian modern tidak hanya meningkatkan hasil panen tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan pertanian yang lebih ramah lingkungan, efisien, dan aman bagi kesehatan manusia. Pendekatan ini mengoptimalkan potensi bioteknologi dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih tahan terhadap perubahan iklim dan ancaman penyakit tanaman.

Keberlanjutan Dalam Pertanian Melalui Pemanfaatan Mikroorganisme

Pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil panen, tetapi juga berupaya untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih ramah lingkungan. Menurut penelitian Wahyudi et al. (2018), teknologi berbasis mikrobiologi, seperti penggunaan pupuk hayati dan biopestisida, berpotensi besar dalam mengurangi dampak negatif dari penggunaan bahan kimia sintetis yang merusak lingkungan dan kesehatan manusia. Dengan mengurangi ketergantungan pada bahan kimia, mikroorganisme dapat berkontribusi pada keberlanjutan sektor pertanian yang lebih ekologis.

Pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan hasil panen, tetapi juga untuk menciptakan sistem pertanian yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan. Salah satu tantangan utama yang dihadapi oleh sektor pertanian saat ini adalah ketergantungan yang tinggi pada bahan kimia sintetis, seperti pupuk kimia dan pestisida, yang dapat merusak ekosistem dan kesehatan manusia. Penggunaan pupuk kimia yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran tanah dan air, sementara pestisida kimia dapat membunuh organisme non-target dan mengurangi keragaman hayati. Oleh karena itu, penerapan teknologi berbasis mikroorganisme dalam

pertanian, seperti pupuk hayati dan biopestisida, menjadi solusi yang sangat penting untuk mengurangi dampak negatif ini.

Menurut Wahyudi et al. (2018), penggunaan pupuk hayati yang mengandung mikroorganisme seperti *Azospirillum* dan *Rhizobium* telah terbukti meningkatkan kesuburan tanah dan ketersediaan nutrisi bagi tanaman tanpa perlu ketergantungan pada pupuk kimia. Selain itu, mikroorganisme juga dapat digunakan untuk mengendalikan hama dan penyakit tanaman melalui biopestisida yang mengandung organisme pengendali hayati, seperti *Trichoderma* spp. atau bakteri *Bacillus thuringiensis*. Biopestisida ini bekerja dengan cara menghambat pertumbuhan patogen atau merusak jaringan tubuh serangga hama, tanpa membahayakan lingkungan atau organisme lainnya. Dengan demikian, teknologi berbasis mikroorganisme dapat mendukung pertanian yang lebih berkelanjutan dengan mengurangi polusi tanah dan air serta meningkatkan keragaman hayati.

Selain itu, mikroorganisme juga berperan dalam memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas retensi air, yang sangat penting dalam menghadapi tantangan perubahan iklim. Mikoriza, misalnya, membentuk hubungan simbiotik dengan akar tanaman, meningkatkan penyerapan air dan nutrisi, serta meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan. Hal ini memberikan keuntungan ganda, yakni mengurangi kebutuhan irigasi dan meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi cuaca ekstrem. Seiring dengan peningkatan kesadaran tentang pentingnya keberlanjutan, pemanfaatan mikroorganisme dalam pertanian diharapkan dapat menjadi salah satu strategi utama untuk mencapai sistem pertanian yang ramah lingkungan, mengurangi ketergantungan pada bahan kimia, dan mendukung ketahanan pangan global.

Dengan demikian, pendekatan bioteknologi berbasis mikroorganisme tidak hanya menawarkan solusi untuk meningkatkan hasil pertanian, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem pertanian di masa depan. Pemanfaatan teknologi ini dapat menjadi langkah signifikan dalam menciptakan sistem pertanian yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan mampu bertahan dalam menghadapi tantangan perubahan iklim dan degradasi lahan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan pembahasan, mikroorganisme tanah memiliki peran penting dalam mendukung produktivitas tanaman melalui mekanisme biologis seperti fiksasi nitrogen, dekomposisi bahan organik, peningkatan penyerapan nutrisi, perlindungan terhadap penyakit tanaman, dan penguatan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan.

Mikroorganisme seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Trichoderma*, dan mikoriza terbukti mampu meningkatkan kesuburan tanah dan hasil panen secara signifikan. Pemanfaatan bioteknologi berbasis mikrobiologi, seperti penggunaan pupuk hayati dan biopestisida, memberikan solusi yang ramah lingkungan untuk menggantikan bahan kimia sintetis yang berisiko merusak lingkungan. Pendekatan ini mendukung terciptanya sistem pertanian berkelanjutan yang efisien dan ekologis.

DAFTAR PUSTAKA

- Azis, F. (2016). Manfaat mikoriza dalam pertanian dan lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Mikrobiologi Tanah*, 1(1), 34–40.
- Hadi, A., & Gunawan, T. (2015). Peran mikroorganisme pengikat nitrogen dalam mendukung produktivitas tanaman. *Jurnal Bioteknologi Pertanian*, 7(2), 45–52.
- Handoko, B., & Arifin, T. (2017). *Mikroba tanah dan potensinya dalam pertanian berbasis biologi*. Surabaya: Universitas Airlangga Press.
- Hermanto, A., & Pratama, D. (2018). Peranan PGPR dan mikoriza dalam mendukung sistem pertanian lestari. *Jurnal Biologi dan Pertanian*, 9(...).
- Iswanto, D., & Yuliana, R. (2021). Pengaruh PGPR terhadap pertumbuhan dan produktivitas tanaman padi. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 23(3), 187–195.
- Kurniawan, F. (2020). Pemanfaatan mikroorganisme dalam meningkatkan produktivitas tanaman jagung di lahan marginal. *Jurnal Penelitian Pertanian*, 8(3), 134–140.
- Lestari, W. (2016). Pemanfaatan teknologi biopestisida dalam pengendalian hama pada tanaman hortikultura. *Jurnal Teknologi Pertanian*, 5(1), 67–74.
- Putri, N., Sari, D., & Lestari, P. (2019). Efek penggunaan biopestisida *Bacillus thuringiensis* terhadap pengendalian hama tanaman. *Jurnal Agronomi*, 11(2), 45–52.
- Rahmat, H., & Kusuma, A. (2020). Potensi bioteknologi hayati dalam mendukung pertanian ramah lingkungan. *Jurnal Agrosains*, 14(3), 123–130.
- Setiawan, A. (2019). Hubungan simbiotik mikoriza dan tanaman dalam meningkatkan ketahanan terhadap kekeringan. *Jurnal Agrikultura*, 16(1), 12–20.
- Siregar, H. (2020). Efektivitas biopestisida berbasis *Trichoderma spp.* dalam mengendalikan penyakit tanaman padi. *Jurnal Proteksi Tanaman*, 9(2), 101–108.
- Sutanto, R. (2014). *Kesuburan tanah berbasis biologi dan peran mikroorganisme dalam pertanian berkelanjutan*. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Wahyudi, A., Suryanto, R., & Fitriani, D. (2018). Aplikasi mikrobiologi tanah dalam sistem pertanian organik. *Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 10(4), 250–265.
- Widodo, S. (2015). Peran *Rhizobium* dalam fiksasi nitrogen pada tanaman polong-polongan. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*, 18(2), 80–85.
- Yuliarti, S., & Handayani, T. (2017). Penggunaan pupuk hayati untuk meningkatkan hasil panen dan kualitas tanah. *Jurnal Agroekoteknologi*, 15(2), 89–96.