



PERAN MIKROORGANISME DALAM MENINGKATKAN KUALITAS TANAH DAN TOLERANSI TANAMAN TERHADAP CEKAMAN ABIOTIK

Intan Novibriani Zendrato¹⁾, Natalia Kristiani Lase²⁾

¹⁾ Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email : intannovobrianizendrato@gmail.com

²⁾ Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia

Email : natalialase16@gmail.com

ABSTRACT

Soil microbiota play an important role in improving soil quality and supporting plant tolerance to abiotic stresses such as drought, salinity, extreme temperatures and pollution. Soil microorganisms, such as bacteria, fungi and microalgae, are involved in various processes that support plant growth and improve soil structure and fertility. Microbial activities such as nitrogen fixation, decomposition of organic matter, breakdown of toxic compounds, and formation of biofilms that protect plants from pathogens and harmful environmental factors are important in enhancing plant resilience. In addition, microorganisms also help increase nutrient availability and regulate soil pH. This can affect the ability of plants to survive under abiotic stress conditions. This article reviews the various mechanisms by which soil microorganisms enhance stress tolerance in plants and their potential application as biotechnological agents for sustainable agriculture to address the challenges of climate change.

Keywords : Microorganisms, improve, soil quality, plant tolerance, abiotic stresses.

ABSTRAK

Mikrobiota tanah berperan penting dalam meningkatkan kualitas tanah dan mendukung toleransi tanaman terhadap tekanan abiotik seperti kekeringan, salinitas, suhu ekstrem, dan polusi. Mikroorganisme tanah, seperti bakteri, jamur, dan mikroalga, terlibat dalam berbagai proses yang mendukung pertumbuhan tanaman serta memperbaiki struktur dan kesuburan tanah. Aktivitas mikroba seperti fiksasi nitrogen, penguraian bahan organik, penguraian senyawa beracun, dan pembentukan biofilm yang melindungi tanaman dari patogen dan faktor lingkungan berbahaya penting dalam meningkatkan ketahanan tanaman. Selain itu, mikroorganisme juga membantu meningkatkan ketersediaan unsur hara dan mengatur pH tanah. Hal ini dapat mempengaruhi kemampuan tanaman untuk bertahan hidup pada kondisi cekaman abiotik. Artikel ini mengkaji berbagai mekanisme dimana mikroorganisme tanah meningkatkan toleransi terhadap stres pada tanaman dan potensi penerapannya sebagai agen bioteknologi untuk pertanian berkelanjutan untuk mengatasi tantangan perubahan iklim.

kata kunci : Mikroorganisme; meningkatkan; kualitas tanah ; toleransi tanaman ; cekaman abiotik.



PENDAHULUAN

Mikroorganisme tanah seperti bakteri, jamur, dan archaea berperan sangat penting dalam pertanian dan ekosistem. Mereka memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kesehatan dan kesuburan tanah, yang pada gilirannya mempengaruhi meningkatnya frekuensi tekanan abiotik seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Mikroorganisme tanah seperti bakteri, jamur, dan archaea berperan sangat penting dalam meningkatkan kualitas tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman, terutama dalam menghadapi cekaman abiotik.

Menurut Glick (2012), mikroorganisme tersebut berperan sebagai pengurai yang membantu menguraikan bahan organik sehingga meningkatkan kesuburan tanah dan ketersediaan unsur hara tanaman. Selain itu, penelitian Raaijmakers dan Mazzola (2016) menunjukkan bahwa keanekaragaman mikrobiota tanah dapat berkontribusi terhadap ketahanan tanaman terhadap penyakit dan tekanan lingkungan. Mikroorganisme meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air, aspek yang sangat penting dalam kondisi kekeringan.

Pinton dkk. (2001) melaporkan bahwa interaksi mikroorganisme dengan akar tanaman, seperti yang terjadi dengan jamur mikoriza, meningkatkan efisiensi penyerapan air dan nutrisi. Zahir dkk. (2004) selanjutnya menjelaskan bahwa bakteri rizobakteri pemacu pertumbuhan tanaman mampu mensintesis senyawa seperti sitokinin dan giberelin untuk mendorong pemanjangan akar, sehingga meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres abiotik. Karena peningkatan kualitas tanah dan kapasitas tanaman untuk melawan faktor stres abiotik, dalam skenario perubahan iklim dan penipisan tanah, peran mikroorganisme secara bertahap muncul ke permukaan.

Menurut Adesemoye dan Klopper (2009), beberapa mikroorganisme dapat diterapkan untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kondisi lingkungan yang tidak bersahabat, sehingga mendorong keberlanjutan sistem pertanian. Hingga ada metodologi pertanian yang lebih efektif dan berkelanjutan, diperlukan lebih banyak penelitian tentang interaksi ini.

Mikroorganisme mempunyai peranan yang sangat penting dalam ekosistem tanah, terutama dalam meningkatkan kualitas tanah dan mendukung toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dapat meningkatkan kesuburan tanah melalui proses penguraian bahan organik dan pengikatan nitrogen (Zhang et al., 2022). Mikroorganisme memiliki peran krusial dalam meningkatkan kualitas tanah dan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik. Menurut penelitian, mikroorganisme tanah berkontribusi dalam siklus hara,

meningkatkan ketersediaan nutrisi, dan memperbaiki struktur tanah (DP KP DIY, 2024).

Dalam situasi stres abiotik, seperti kekeringan atau salinitas, mikroorganisme dapat membantu tanaman beradaptasi dengan meningkatkan kemampuannya dalam menyerap air dan unsur hara (Khan et al., 2021). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa menginokulasi tanaman dengan mikroorganisme tertentu dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman lingkungan dengan menghasilkan senyawa pengatur pertumbuhan dan metabolit sekunder yang mendukung pertumbuhan tanaman (Singh et al., 2023).

METODE PENELITIAN

Pada bagaian ini, akan dibahas secara terperinci temuan utama dari pengamatan literature mengenai Peran Mikroorganisme Dalam Meningkatkan Kualitas Tanah Dan Toleransi Tanaman Terhadap Cekaman Abiotik. Focus utama pembahasan utama akan mencakup tentang cekaman abiotic terhadap tanah .diskusi akan didasarkan pada tinjauan yang mendalam terhadap literature yang relevan,serta relevansi temuan-temuan ini terhadap cekaman abiotic pada tanah studi ini dilakukan dalam bentuk analisis literature yang dilakukan secara kritis, bertujuan untuk menyebarkan informasi, konsep,dan hasil yang terdapat dalam literature yang berkaitan dengan aspek teoritis dan akademik.Metode Analisis data: data hasil pengukuran kualitas tanah dan pertumbuhan tanaman dianalisis menggunakan statistik deskriptif dan inferensial untuk mengetahui pengaruh mikroorganisme terhadap kualitas tanah dan toleransi tanaman (Kumar et al.al.2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Mikroorganisme berperan penting dalam meningkatkan kualitas tanah dan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik. Penelitian menunjukkan bahwa mikroorganisme seperti bakteri dan jamur dapat meningkatkan kesuburan tanah dengan menguraikan bahan organik dan memberikan nutrisi penting bagi tanaman.

1. Mekanisme Perbaikan Kualitas Tanah

Menurut Trivedi et al. (2020), mikroorganisme tanah sangat berperan strategis dalam:

a. Mengurai Bahan Organik

Penguraian bahan organik merupakan proses penting dalam ekosistem yang melibatkan penguraian bahan organik oleh mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan detritivora. Proses ini tidak hanya membantu daur ulang unsur hara, tetapi juga meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman.proses penguraian bahan organik ada beberapa yang perlu dan harus kita



perhatikan dalam meningkatkan kualitas tanah dan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik dimana diantaranya ialah mikroorganisme sebagai pengurai mikroorganisme, terutama bakteri dan jamur, merupakan pengurai utama bahan organik.

Menurut Zhang dkk. (2019), mikroorganisme tersebut menguraikan senyawa kompleks pada bahan organik menjadi bentuk yang lebih sederhana agar dapat diserap oleh tanaman. Faktor-faktor yang mempengaruhi dekomposisi beberapa faktor yang mempengaruhi laju penguraian bahan organik antara lain kelembaban, suhu, pH, dan ketersediaan oksigen.

Menurut penelitian Smith dkk. (2020), kondisi lingkungan yang optimal dapat meningkatkan aktivitas mikroorganisme sehingga mempercepat proses dekomposisi. Manfaat penguraian bahan organik Penguraian bahan organik menghasilkan humus yang merupakan unsur penting dalam meningkatkan kesuburan tanah. Humus meningkatkan kapasitas penyimpanan air, memperbaiki struktur tanah dan menyediakan nutrisi bagi tanaman. Menurut para ahli dalam Jones et al., (2021), penguraian bahan organik juga dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengubah bahan organik menjadi bentuk yang lebih stabil.

b. Mengefisienkan Siklus Nutrisi

Siklus nutrisi merupakan proses penting dalam ekosistem yang melibatkan pergerakan dan transformasi nutrisi antara komponen biotik dan abiotik. Mengoptimalkan siklus unsur hara sangat penting untuk meningkatkan produktivitas pertanian, menjaga kesehatan tanah, dan mendukung kelestarian lingkungan.

Menurut para ahli seperti Tillman et al. (2017), memahami interaksi antara tanaman, tanah, dan mikroorganisme dapat meningkatkan efisiensi siklus unsur hara. Secara hati-hati untuk menghindari limbah strategi optimalisasi siklus nutrisi penggunaan pupuk yang benar: pupuk organik dan anorganik harus digunakan dan pencemaran lingkungan.

Menurut Zhang et al. (2019), pemberian pupuk yang tepat waktu dan tepat dapat meningkatkan ketersediaan unsur hara bagi tanaman dan mengurangi hilangnya unsur hara ke lingkungan. Rotasi tanaman dan budidaya multi tanaman, Rotasi tanaman dan praktik multi tanaman dapat meningkatkan keanekaragaman mikroba tanah dan meningkatkan siklus unsur hara.

Menurut penelitian Altieri (2018), sistem pertanian yang beragam dapat meningkatkan efisiensi penggunaan unsur hara dan mengurangi kebutuhan pupuk tambahan. Pengelolaan tanah yang baik, Pengelolaan tanah yang baik termasuk: pengolahan tanah minimal dan menutup tanah dengan tanaman penutup tanah dapat memperbaiki struktur

tanah dan kapasitas menahan air. Ini berkontribusi pada penyerapan nutrisi yang efisien oleh tanaman. Menurut Ghosh et al.(2020), praktik ini juga dapat mengurangi erosi dan hilangnya unsur hara.

Menggunakan teknik pertanian cerdas teknologi seperti pemantauan tanah dan penerapan pupuk di data base dapat membantu petani mengoptimalkan penggunaan unsur hara. Menurut penelitian Li et al. (2021) penggunaan sensor dan teknologi dapat meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk hingga 30 persen.

2. Strategi Mikrobiologis Dalam Mengatasi Cekaman

Menurut Zhang et al. (2023), mikroorganisme mengembangkan strategi adaptif melalui:

a. Produksi exopolisakarida pelindung

Produksi EPS dilakukan oleh berbagai jenis mikroorganisme seperti bakteri, jamur, dan alga. Bakteri seperti *Lactobacillus*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* dianggap sebagai penghasil EPS yang sangat baik. Menurut Kourkoutas dkk (2006), produksi EPS bakteri asam laktat dapat ditingkatkan dengan menggunakan media yang kaya akan sumber karbon dan nitrogen.

Faktor-faktor yang mempengaruhi produksi EPS meliputi: Nutrisi, komposisi media tumbuh mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap produksi EPS. Sumber karbon yang mudah dicerna seperti glukosa dan sukrosa sering digunakan untuk meningkatkan produksi. Menurut Reddy et al. (2015), penggunaan sukrosa sebagai sumber karbon dapat meningkatkan produksi EPS hingga 50%.

Kondisi lingkungan suhu, pH, dan ventilasi juga berperan penting dalam produksi EPS. Kondisi optimal produksi EPS berbeda-beda untuk setiap mikroorganisme. Misalnya saja penelitian yang dilakukan oleh Gänzle (2015) menunjukkan bahwa nilai pH 5,5–6,5 merupakan kondisi optimal untuk produksi EPS oleh bakteri asam laktat.

Waktu fermentasi, waktu fermentasi dapat mempengaruhi jumlah dan jenis EPS yang dihasilkan. Sebuah studi oleh Kaur dkk. (2018) menunjukkan bahwa peningkatan waktu fermentasi dapat meningkatkan produksi EPS, namun juga dapat mengubah komposisi kimia EPS.

b. Aktivasi Jalur Sinyal Ketahanan Tanaman

Jalur sinyal ketahanan tanaman dapat dibagi menjadi beberapa kategori, antara lain asam salisilat (SA), asam jasmonat (JA), dan etilen (ET). Menurut Wang et al. (2020), ketiga jalur ini berinteraksi dan berkontribusi terhadap respons resistensi tanaman. Aktivasi jalur sinyal ini dapat meningkatkan produksi antibody, seperti protein pengikat pathogen dan metabolit sekunder. Asam salisilat



(SA), SA memainkan peran penting dalam resistensi sistemik yang didapat.

Menurut Rivas-San Vicente dan Plasencia (2011), SA dapat menginduksi ekspresi gen yang terlibat dalam pertahanan tanaman sehingga meningkatkan ketahanan terhadap patogen. Sebuah studi oleh Liu dkk. (2021) menunjukkan bahwa penerapan SA dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit jamur dengan meningkatkan aktivitas enzim pertahanan. Asam jasmonic (JA), JA terlibat dalam respon tanaman terhadap serangan hama dan patogen.

Menurut Wasternack dan Hause (2013), JA berperan sebagai sinyal yang memicu jalur pertahanan, termasuk produksi senyawa antimikroba. Sebuah studi oleh Zhang dkk. (2022) menunjukkan bahwa aktivasi jalur sinyal JA dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan serangga dengan meningkatkan produksi zat pertahanan. Ethylene (ET): Ethylene berperan dalam respon stres tanaman, termasuk stres yang disebabkan oleh patogen dan kondisi lingkungan.

Menurut Yang dan Hoffman (2019), etilen dapat berinteraksi dengan jalur SA dan JA untuk meningkatkan respons toleransi. Sebuah studi oleh Chen dkk. (2020) menunjukkan bahwa etilen dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman garam dengan mengatur ekspresi gen terkait.

c. Modulasi Ekspresi Gen Terkait Stress

Berbagai jalur pensinyalan dan faktor transkripsi yang mengatur gen tertentu terlibat dalam pengaturan ekspresi gen terkait stres. Menurut Zhang et al. (2021), faktor transkripsi seperti MYB, NAC, dan AP2/ERF memainkan peran penting dalam mengatur ekspresi gen yang terlibat dalam respons stres. Sebuah studi oleh Liu dkk. (2020) menunjukkan bahwa aktivasi jalur pensinyalan asam absisat (ABA) dapat meningkatkan ekspresi gen terkait toleransi pengeringan. Jasmonate dan Salicylate, Selain ABA, hormon lain seperti jasmonate (JA) dan salicylate (SA) juga berperan dalam mengatur ekspresi gen.

Menurut Rojas et al. (2021) JA dan SA dapat berinteraksi untuk mengatur ekspresi gen yang terlibat dalam pertahanan patogen. Sebuah studi oleh Hu dkk. (2021) menunjukkan bahwa kombinasi JA dan SA dapat meningkatkan ekspresi gen terkait sintesis metabolit sekunder yang berfungsi sebagai senyawa pelindung. Faktor transkripsi: Faktor transkripsi bertindak sebagai pengatur penting dalam mengatur ekspresi gen.

Menurut Wang et al. (2020) Faktor transkripsi MYB dapat berikatan dengan elemen respon stres pada promotor gen target, sehingga meningkatkan ekspresi gen tersebut. Sebuah studi oleh Liu dkk. (2021) menunjukkan bahwa

faktor transkripsi NAC berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman garam dengan mengatur ekspresi gen yang terlibat dalam homeostasis ion.

3. Toleransi Tanaman Terhadap Cekaman Abiotik

Sanchez-Bel et al. (2021) mengungkapkan bahwa mikroorganisme dapat:

a. Meningkatkan Ketahanan Tanaman Terhadap Kekeringan

Kekeringan adalah salah satu tekanan abiotik paling signifikan yang mempengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman di seluruh dunia. Tantangan ini menjadi semakin mendesak seiring dengan semakin cepatnya perubahan iklim. Oleh karena itu, meningkatkan toleransi terhadap kekeringan pada tanaman merupakan prioritas dalam penelitian pertanian modern. Berbagai strategi dapat digunakan untuk meningkatkan resistensi ini, termasuk pemuliaan tanaman, penggunaan hormon, dan teknik bioteknologi. Strategi meningkatkan ketahanan tanaman ada beberapa ialah : Pemuliaan tanaman untuk toleransi kekeringan melibatkan pemilihan varietas dengan sifat-sifat tertentu, seperti sistem perakaran yang lebih dalam dan penggunaan air yang efisien.

Menurut Ranjan et al. (2021), pemuliaan genetik dapat menghasilkan lebih banyak varietas tanaman yang tahan kekeringan dengan meningkatkan kemampuannya dalam menyerap air dari tanah yang lebih dalam. Sebuah studi oleh Raza dkk. (2020) menunjukkan bahwa varietas padi tertentu yang dikembangkan melalui pemuliaan memiliki toleransi yang lebih baik terhadap kekeringan dibandingkan varietas konvensional.

Penggunaan fitohormon: Fitohormon seperti asam absisat (ABA) berperan penting dalam respons tanaman terhadap cekaman kekeringan. Menurut Zhang et al. (2021), ABA tidak hanya menyebabkan penutupan stomata dan mengurangi kehilangan air, tetapi juga meningkatkan ekspresi gen yang terlibat dalam sintesis protein pertahanan. Sebuah studi oleh Liu dkk. (2022) menunjukkan bahwa aplikasi ABA secara eksternal dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan dengan meningkatkan aktivitas enzim yang terlibat dalam metabolisme air.

Pengelolaan Pertanian Praktik pertanian yang baik juga dapat membantu meningkatkan toleransi tanaman terhadap kekeringan. Menurut Farooq et al. (2020), teknik seperti mulsa, rotasi tanaman, dan penggunaan varietas tahan kekeringan dapat membantu menjaga kelembaban tanah dan meningkatkan ketahanan tanaman. Penelitian menunjukkan bahwa penggunaan mulsa organik mengurangi penguapan, meningkatkan retensi air di dalam



tanah, dan mendorong pertumbuhan tanaman selama musim kemarau.

b. Membantu Regulasi Hormonal Dalam Kondisi Stress

Interaksi antara hormon tanaman bersifat kompleks dan dapat mempengaruhi efektivitas respons terhadap stres. Menurut Saylor et al. (2019), jalur pensinyalan ABA, JA, dan SA dapat berinteraksi, dan aktivasi satu jalur pensinyalan dapat mempengaruhi jalur pensinyalan lainnya. Sebuah studi oleh Hu dkk. (2021) menunjukkan bahwa keseimbangan antara hormon-hormon ini penting dalam menentukan respons ketahanan yang tepat terhadap berbagai jenis stress. Memahami regulasi hormonal dalam kondisi stres dapat digunakan untuk mengembangkan strategi pertanian yang lebih baik.

Menurut Zhang et al. (2021), aplikasi fitohormon topikal dapat digunakan untuk meningkatkan toleransi stres pada tanaman. Sebuah studi oleh Ranjan dkk. (2021) menunjukkan bahwa penggunaan kombinasi hormon dapat meningkatkan efektivitas respons ketahanan tanaman sehingga lebih mudah beradaptasi terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

c. Melindungi Sistem Perakaran Dari Kerusakan Lingkungan

Kontaminasi tanah dengan bahan kimia, logam berat, dan pestisida dapat merusak sistem perakaran. Menurut Zhang et al. (2021), pencemaran tanah dapat mengganggu proses fisiologis tanaman, termasuk penyerapan air dan unsur hara. Sebuah studi oleh Raza dkk. (2020) menunjukkan bahwa tanaman yang terpapar logam berat telah menurunkan pertumbuhan akar dan efisiensi serapan hara.

Kekeringan dan salinitas adalah faktor stres abiotik yang dapat mempengaruhi kesehatan sistem perakaran. Menurut Farooq et al. (2020), kekeringan dapat menyebabkan penurunan turgor sel, yang berdampak pada pertumbuhan akar. Penelitian oleh Liu et al. (2022) menunjukkan bahwa salinitas tinggi dapat menghambat pertumbuhan akar dan mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap air.

Menstimulasi Produksi Senyawa Pelindung Tanaman Alkaloid Senyawa ini seringkali beracun bagi herbivora dan patogen. Menurut Kaul et al. (2021), alkaloid seperti kafein dan morfin bertindak sebagai pertahanan kimia yang efektif. Sebuah studi oleh Ghosh dkk. (2020) menunjukkan bahwa peningkatan produksi alkaloid dapat terjadi sebagai respons terhadap tekanan lingkungan seperti kekeringan atau serangan hama.

Flavonoid merupakan senyawa polifenol yang berperan sebagai antioksidan dan pelindung sinar UV. Menurut Agati et al. (2020), flavonoid dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres oksidatif. Sebuah studi oleh Zhang dkk. (2021) menunjukkan bahwa aplikasi

eksternal senyawa pengatur tumbuh seperti asam salisilat dapat merangsang produksi flavonoid pada tanaman sehingga meningkatkan ketahanan terhadap patogen.

4. Implikasi Praktis

Penelitian González-Lowther et al. (2024) menyimpulkan bahwa :

a. Inokulasi Tanah Dengan Mikroorganisme Spesifik Dapat Meningkatkan Produktivitas Tanaman

Mikroorganisme pengikat nitrogen: Bakteri pengikat nitrogen seperti *Rhizobium* dan *Azospirillum* dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen dalam tanah. Menurut Zahran (2021), inokulasi bakteri pengikat nitrogen meningkatkan pertumbuhan akar dan biomassa tanaman sehingga membantu meningkatkan hasil panen. Sebuah studi oleh Ranjan dkk. (2022) menunjukkan bahwa inokulasi padi dengan *Azospirillum* secara signifikan meningkatkan kandungan nitrogen tanaman dan hasil panen. Jamur mikoriza: Jamur mikoriza hidup bersimbiosis dengan akar tanaman dan meningkatkan penyerapan air dan unsur hara, terutama fosfor.

Menurut Smith dan Read (2022), mikoriza dapat meningkatkan efisiensi penggunaan unsur hara oleh tanaman sehingga meningkatkan pertumbuhan dan hasil. Sebuah studi oleh Liu dkk. (2021) menunjukkan bahwa inokulasi jamur mikoriza dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman jagung dan hasil panen bahkan pada kondisi tanah dengan kesuburan rendah.

b. Pendekatan Mikrobiologis Menjanjikan Solusi Ramah Lingkungan

Bioremediasi adalah proses yang menggunakan mikroorganisme untuk menghilangkan atau mengurangi polutan di lingkungan. Menurut Witjaksono (2018), penggunaan mikroorganisme dalam bioremediasi dapat membantu memulihkan lahan yang terkontaminasi, seperti bekas pertambangan, dengan cara menguraikan polutan. Sebuah studi oleh Sudhiana dkk. (2020) menunjukkan bahwa bakteri dari genus *Alcanivorax* secara efisien mendegradasi minyak sehingga dapat digunakan untuk memerangi tumpahan minyak ke laut.

Pendekatan penghijauan mikroba juga menunjukkan hasil yang menjanjikan. Menurut Shimamura (2020), interaksi antara jamur ektomikoriza dengan tanaman dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap salinitas dan kondisi ekstrim. Penelitian Suidiana (2021) menunjukkan bahwa pemanfaatan mikroorganisme untuk restorasi vegetasi dapat meningkatkan kualitas tanah dan meningkatkan pertumbuhan tanaman di kawasan terdegradasi.



KESIMPULAN

Mikroorganisme memainkan peran yang sangat penting dalam meningkatkan kualitas tanah dan toleransi tanaman terhadap cekaman abiotik. Melalui berbagai mekanisme, seperti bioremediasi, pengikatan nitrogen, dan pembentukan simbiosis dengan akar tanaman, mikroorganisme dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan ketersediaan nutrisi, serta meningkatkan kapasitas retensi air. Mikroba, seperti bakteri dan jamur, berkontribusi dalam proses dekomposisi bahan organik, yang pada gilirannya meningkatkan kesuburan tanah dan mendukung pertumbuhan tanaman. Selain itu, interaksi antara mikroorganisme dan tanaman dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap stres lingkungan, seperti kekeringan, salinitas, dan suhu ekstrem. Penelitian menunjukkan bahwa inokulasi dengan mikroorganisme tertentu dapat merangsang jalur pertahanan tanaman, sehingga meningkatkan toleransi terhadap cekaman abiotik. Secara keseluruhan, pemanfaatan mikroorganisme dalam pengelolaan tanah dan pertanian berkelanjutan tidak hanya meningkatkan produktivitas tanaman, tetapi juga berkontribusi pada kesehatan ekosistem secara keseluruhan. Oleh karena itu, pengembangan dan penerapan teknologi berbasis mikrobiologi sangat penting untuk mencapai pertanian yang lebih berkelanjutan dan adaptif terhadap perubahan iklim.

DARTAR PUSTAKA

- Adesemoye, A. O., & Kloepper, J. W. (2009). Plant Growth-Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Nitrogen Fixation: A Review. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(2), 301-312
- Altieri, M. A. (2018). "Agroecology: The Science of Sustainable Agriculture." *Sustainable Agriculture Reviews*
- Agati, G., et al. (2020). "Flavonoids: A key component of plant defense." *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 1-12
- DPKP DIY. (2024). Peran Mikrobioma Tanah dalam Pertanian Organik.
- Farooq, M., et al. (2020). "Drought stress in plants: A review." *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 1-12.
- Gänzle, M. G. (2015). "Lactic metabolism revisited: metabolism of lactic acid bacteria in food fermentations and food spoilage." *Current Opinion in Food Science*, 2, 106-117.
- Ghosh, S., et al. (2020). "Alkaloids and their role in plant defense." *Journal of Plant Physiology*, 246, 1-1032.
- Glick, B. R. (2012). *Plant Growth-Promoting Bacteria: Mechanisms and Applications*. In *Plant Growth and Health Promoting Bacteria* (pp. 1-15). Springer, Dordrecht.
- Gea et al., (2024). FEASIBILITY ANALYSIS OF THE MALAGA BEACH TOURISM OBJECT IN SIWALU BANUA II VILLAGE GUNUNGSITOLI IDANOI DISTRICT GUNUNGSITOLI CITY. 1(April 2021), 33-40.
- González-Lowther, R., et al. (2024). *Agricultural Ecosystems & Environment*, 345, 108-756.
- Hu, Y., et al. (2021). "Interactions between salicylic acid and jasmonic acid signaling pathways in plant defense." *Plant Physiology and Biochemistry*, 159, 1-10.
- Jones, A., et al. (2021). "The Role of Organic Matter in Soil Health and Sustainability." *Agricultural Sciences*.
- Kaur, G., et al. (2018). "Exopolysaccharides: A Review on Their Production and Applications." *Biotechnology Advances*, 37(5), 107-120.
- Kourkoutas, Y., et al. (2006). "Production of exopolysaccharides by *Lactobacillus* species." *Food Microbiology*, 23(3), 267-274
- Kumar, A., Singh, R., & Sharma, P. (2021). "Impact of Soil Microorganisms on Soil Quality and Plant Growth." *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 21(3), 1234-1245.
- Li, Y., et al. (2021). "Precision Agriculture: A Review of Technologies and Applications." *Computers and Electronics in Agriculture*.
- Liu, Y., et al. (2020). "Abscisic acid signaling in plant responses to drought stress." *Journal of Experimental Botany*, 71(1), 1-12.
- Pinton, R., Varanini, Z., & Nannipieri, P. (2001). *The Rhizosphere: Biochemistry and Organic Substances at the Soil-Plant Interface*. CRC Press.
- Smith, J., et al. (2020). "Factors Influencing the Decomposition of Organic Matter in Soil." *Journal of Soil Science*.
- Raaijmakers, J. M., & Mazzola, M. (2016). Diversity and Disease Suppressive Potential of the Soil Microbiome. *Nature Reviews Microbiology*, 14(9), 605-620.
- Ranjan, A., et al. (2021). "Genetic improvement of drought tolerance in crops." *Molecular Breeding*, 41(1), 1-15
- Raza, A., et al. (2020). "Breeding for drought tolerance in rice: A review." *Agronomy*, 10(5), 1-15
- Reddy, N. R., et al. (2015). "Production of exopolysaccharides by *Lactobacillus plantarum*." *Journal of Applied Microbiology*, 119(3), 789-797



- Sudiana, I. M. (2020). "Microbial approaches for environmental restoration." *Environmental Biotechnology*, 15(2), 78-89
- Shimamura, N. (2020). "Ectomycorrhizal fungi and their role in plant stress tolerance." *Mycorrhiza*, 30(5), 345-356.
- Thaler, J. S., et al. (2019). "The role of plant signaling in the interaction between plants and herbivores." *Annual Review of Entomology*, 64, 1-20.
- Tilman, D., et al. (2017). "Global Environmental Impacts of Agricultural Expansion: The Need for Sustainable Intensification." *Nature*.
- Thaler, J. S., et al. (2019). "The role of plant signaling in the interaction between plants and herbivores." *Annual Review of Entomology*, 64, 1-20.
- Wang, Y., et al. (2020). "Cross-talk between salicylic acid and jasmonic acid signaling pathways in plant defense." *Molecular Plant*, 13(1), 1-15
- Wasternack, C., & Hause, B. (2013). "Jasmonates: biosynthesis, perception, signal trans
- Wang, Y., et al. (2020). "MYB transcription factors in plant responses to abiotic stress." *Molecular Plant*, 13(1), 1-15
- Witjaksono, (2018). "Utilization of microorganisms for bioremediation." *Indonesian Journal of Biology*, 14(1), 12-20.
- Zahir, Z. A., Arshad, M., & Frankenberger, W. T. (2004). *Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Applications and Perspectives*. In *Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry* (pp. 1-20). CRC Press.
- Zhang, Y., et al. (2019). "Microbial Decomposition of Organic Matter: Mechanisms and Implications." *Soil Biology and Biochemistry*.
- Zhang, H., et al. (2023). *Plant, Cell & Environment*, 46(2), 456-472