

PERAN MIKROBIOMA TANAH DALAM MEMPENGARUHI PERKECAMBAHAN
SEBAGAI FAKTOR PENDUKUNG PERTANIAN BERKELANJUTAN

*THE ROLE OF SOIL MICROBIOME IN INFLUENCING SEED GERMINATION AS A
SUPPORTING FACTOR FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE*

Nina Irawan¹, Cinta Radila Putri², Sarah Deriska Pranita³, Tri Widya Edelwis⁴, Nurmiati Nurmiati⁵

¹²³⁴Program Studi Pendidikan Biologi, FKIP-Universitas Maritim Raja Ali Haji
Dompak, Tanjungpinang, Kepulauan Riau Kode Pos 29124

⁵Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas
Jalan Raya Unand, Padang, Sumatera Barat Kode Pos 25163

*e-mail korespondensi: ninairawan1506@gmail.com¹, cintaradila31@gmail.com²,
sarahderiska3@gmail.com³, triwidyadelwis@gmail.com⁴, nurmiati@sci.unand.ac.id⁵

Abstrak

Mikrobioma tanah merupakan komunitas mikroorganisme kompleks yang memainkan peran penting dalam siklus hidup tumbuhan termasuk fase perkecambahan benih. Komunitas mikroba tanah berkontribusi pada kesehatan tanaman dan merupakan kompleks yang sangat beragam. Komunitas mikroba tanah memengaruhi pertumbuhan tanaman dengan berbagai cara, seperti meningkatkan penyerapan nutrisi, meningkatkan sekresi eksudat akar, dan meningkatkan pertahanan tanaman terhadap patogen. Selain itu, interaksi antara tanaman dan mikrobioma tanah juga sangat penting. Ini terutama terjadi di rizosfer, bagian kecil tanah di mana akar tanaman memengaruhi mikrobioma melalui sekresi eksudat yang mengandung gula, vitamin, asam organik, hormon, asam amino, dan asam lemak. Artikel ini bertujuan untuk mengkaji mikrobioma tanah yang berperan dalam mempengaruhi perkecambahan sebagai faktor pendukung pertanian berkelanjutan. Jenis penelitian ini menggunakan metode tinjauan literatur. Pengumpulan informasi dilakukan melalui studi pustaka dengan menganalisis data dari berbagai sumber dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Hasil penelitian didapat bahwa mikrobioma seperti *Azotobacter* sp. , *Lactobacillus* sp. , *Trichoderma* sp. , *Bacillus subtilis*, *Gliocladium* sp., dan *Beauveria bassiana* dapat memberikan dampak terhadap perkecambahan tumbuhan. Dari kajian literatur yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa perkecambahan adalah tahap awal yang sangat penting dalam siklus hidup tanaman berbiji.

Kata kunci: mikrobioma tanah; rizosfer; filisfer; perkecambahan; pertanian berkelanjutan.

Abstract

The soil microbiome is a complex community of microorganisms that plays an important role in the life cycle of plants, including the seed germination phase. The soil microbial community contributes to plant health and is a highly diverse complex. The soil microbial community influences plant growth in various ways, such as enhancing nutrient uptake, increasing root exudate secretion, and improving plant defense against pathogens. Additionally, the interaction between plants and the soil microbiome is also very important. This primarily occurs in the rhizosphere, the small portion of soil where plant roots influence the microbiome through the secretion of exudates containing sugars, vitamins, organic acids, hormones, amino acids, and fatty acids. This article aims to examine the soil microbiome that plays a role in influencing seed germination as a supporting factor for sustainable agriculture. This type of research uses a literature review method. Information collection was conducted through literature studies by analyzing data from various sources over the past 10 years. The research findings indicate that microbiomes such as

Azotobacter sp., *Lactobacillus* sp., *Trichoderma* sp., *Bacillus subtilis*, *Gliocladium* sp., and *Beauveria bassiana* can have an impact on plant germination. From the literature review conducted, it can be concluded that germination is a crucial initial stage in the life cycle of seed-bearing plants.

Keywords: soil microbiome; rhizosphere; phyllosphere; germination; sustainable agriculture.

PENDAHULUAN

Perkecambahan adalah fase awal perkembangan tanaman berbiji di mana pertumbuhan embrio dimulai kembali setelah penyerapan air atau imbibisi. Pada fase ini, embrio mengalami sejumlah perubahan fisiologis di dalam biji yang semula dorman, yang memungkinkan mereka berkembang menjadi tumbuhan muda (Hidayat, 1985). Ketersediaan air di sekitar biji yang disemaikan adalah salah satu syarat yang harus dipenuhi agar benih dapat berkecambah. Namun, air tidak selalu dapat meresap melalui kulit biji ke dalam biji. Kecambah biasanya memiliki sistem perakaran yang baik, terutama akar. Mereka memiliki perkembangan hipokotil yang baik dan sempurna, memiliki daun hijau dan tumbuh baik, serta memiliki satu kotiledon untuk berkecambah (Tamin, 2007). Banyaknya larutan H_2SO_4 yang terserap ke dalam benih akan dipengaruhi oleh metode perkecambahan dengan asam sulfat yang dikombinasikan dengan perendaman yang lama. Namun, penggunaan bahan kimia ini dapat digantikan dengan pendekatan biologis menggunakan mikroorganisme.

Pemahaman tentang dormansi dan perkecambahan menjadi semakin penting mengingat tantangan produksi pangan global. Permintaan untuk hasil pertanian diperkirakan akan naik sekitar 70% pada tahun 2050 (Bandyopadhyay *et al.*, 2017). Namun, praktik pertanian anorganik yang terus-menerus dilakukan dapat menyebabkan degradasi tanah, sehingga berpotensi menurunkan hasil produksi tanaman (Dita & Simarmata, 2024). Salah satu cara yang disarankan untuk menangani masalah ini adalah penerapan teknik pertanian yang ramah lingkungan dengan memanfaatkan mikrobioma tanah yang menguntungkan. Mikrobioma tanah terdiri dari berbagai mikroorganisme seperti jamur, bakteri, virus, dan protozoa yang memiliki peran signifikan dalam meningkatkan kesuburan tanah serta meningkatkan daya tahan tanaman terhadap patogen dan tekanan dari lingkungan (Haney & Ausubel, 2015). Hal ini juga didukung oleh Irawan *et al.* (2024) yang mengatakan bahwa mikroorganisme berupa bakteri memiliki peranan yang memberikan manfaat bagi kehidupan. Mikroorganisme ini berfungsi sebagai agen penguraian senyawa organik,

penyuplai unsur hara, dan pengontrol patogen tanaman (Karlen *et al.*, 2006). Selain itu, beberapa jenis mikroorganisme juga dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap serangan hama dan penyakit, serta mendukung pertanian berkelanjutan dengan mengurangi penggunaan bahan kimia sintetis (Saraswati & Sumarno, 2008).

Peranan mikroba dalam menunjang kesuburan tanah dan meningkatkan hasil pertanian telah menjadi perhatian utama dalam sepuluh tahun terakhir, khususnya berkaitan dengan efek buruk dari pemakaian pupuk dan pestisida kimia sintetis yang berlebihan (Saputro & Hadiyanti, 2023). Beragam macam mikroba tanah seperti *Nitrobacter*, *Streptomyces* sp., dan *Trichoderma* sp. dikenal memiliki kontribusi penting dalam meningkatkan hasil pertanian dan menjaga keberlangsungan ekosistem tanah (Saputro & Hadiyanti, 2023). *Nitrobacter* memiliki peran krusial dalam nitrifikasi, yang adalah proses mengubah nitrogen menjadi bentuk yang dapat diambil oleh tanaman, sehingga meningkatkan kemampuan tanaman dalam menyerap nutrisi (Khasani, 2010). Sementara itu, *Streptomyces* sp. dan *Trichoderma* sp. berperan sebagai agen biologis yang ampuh dalam mengendalikan penyakit pada tanaman serta meningkatkan kesehatan tanah dan ketahanan tanaman (Ulfa *et al.*, 2019). Selain itu, pendekatan yang menjanjikan untuk pertanian berkelanjutan adalah rekayasa mikrobioma rizosfer yang berfokus pada manipulasi mikroorganisme rizosfer untuk menciptakan interaksi positif bagi tanaman (Martin & Schwab, 2012). Mikroba rizosfer seperti rhizobia, *Plant Growth Promote Rhizobacteria* (PGPR), dan mikoriza dapat berfungsi sebagai biostimulan, biofertilizer, dan biokontrol untuk mendukung pertumbuhan tanaman dan adaptasi terhadap cekaman lingkungan (Mhlongo *et al.*, 2018). PGPR merupakan kelompok bakteri yang berada di sekitar akar tanaman dan berperan dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman (Ashrafuzzaman *et al.*, 2009). Contoh bakteri PGPR antara lain *Rhizobium*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Bacillus*, dan *Pseudomonas* (Situngkir *et al.*, 2021).

Selain memacu pertumbuhan tanaman, PGPR juga berperan dalam meningkatkan ketahanan tanaman terhadap tekanan dari faktor

biotik dan abiotik (Koza *et al.*, 2022) *Pseudomonad fluoresen* merupakan salah satu kelompok PGPR yang mampu memproduksi hormon pertumbuhan seperti *Indole Acetic Acid* (IAA) (Advinda, 2020). Selain itu, tanaman dapat mengatur komposisi mikrobioma rizosfer melalui eksudat akar yang berfungsi sebagai sinyal kimia untuk memilih mikroorganisme tertentu yang menguntungkan (Haney & Ausubel, 2015). Mikroba yang dipilih dapat membantu tanaman di dalam pengambilan nutrisi dan penyesuaian terhadap tekanan lingkungan, serta mengurangi ketergantungan terhadap input kimia seperti pupuk dan pestisida (Jousset & Lee, 2023).

Berdasarkan uraian di atas maka diperlukan penelitian yang mengkaji tentang peran mikrobioma tanah dalam mempengaruhi perkecambahan sebagai faktor pendukung pertanian berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan pendekatan kualitatif. Jenis penelitian ini memanfaatkan pendekatan kajian pustaka yang mencakup analisis, penggambaran, penilaian, dan penggabungan dokumen dari berbagai sumber untuk menyampaikan pemahaman yang komprehensif mengenai fungsi mikrobioma dalam proses perkecambahan. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengkaji mikrobioma tanah yang berperan dalam mempengaruhi perkecambahan tumbuhan sebagai faktor pendukung pertanian berkelanjutan. Pengumpulan informasi dilakukan melalui studi pustaka dengan menganalisis data dari berbagai sumber dalam kurun waktu 10 tahun terakhir. Dalam penelitian ini, informasi sekunder dimanfaatkan dan diambil dari berbagai jenis sumber. Sumber data sekunder untuk penelitian ini mencakup jurnal dari dalam negeri dan luar negeri yang bisa diakses melalui google scholar dan lainnya yang terkait.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkecambahan merupakan tahap krusial dalam siklus hidup tanaman berbiji yang menentukan keberhasilan awal pertumbuhan. Proses ini tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi lingkungan fisik seperti ketersediaan air dan suhu, tetapi juga oleh kondisi lingkungan fisik seperti ketersediaan air dan suhu, tetapi juga oleh keberadaan mikroorganisme tanah yang berperan aktif di wilayah rizosfer. Mikrobioma tanah, khususnya kelompok bakteri dan jamur

menguntungkan seperti *Azotobacter* sp., *Trichoderma* sp., dan *Bacillus subtilis*, memiliki kontribusi penting dalam memicu dan mempercepat perkecambahan melalui produksi fitohormon, pelarutan nutrisi, dan perlindungan biologis terhadap patogen. Aktivitas mikroba ini mendukung pembentukan akar yang sehat, pemanjangan hipokotil, serta peningkatan daya tumbuh benih, yang secara keseluruhan menjadi fondasi penting bagi sistem pertanian yang efisien dan berkelanjutan.

Beberapa alasan mengapa metode mekanis saat ini tidak memadai dalam kondisi iklim atau tanah tertentu adalah metode mekanis bersifat infleksibel dan tidak responsif terhadap perubahan kondisi tanah dan iklim. Misalnya, perlakuan dengan asam sulfat (H_2SO_4) untuk mengatasi dormansi benih mungkin efektif secara kimia, tetapi tidak memperhitungkan kondisi biologis tanah, seperti struktur tanah, kandungan air, atau keberadaan mikroorganisme pendukung. Penggunaan bahan kimia secara terus-menerus dapat merusak tanah. Tanah kehilangan kesuburan alaminya, menghasilkan residu berbahaya yang merusak ekosistem mikroba tanah. Metode mekanis tidak meningkatkan atau memperbaiki kualitas tanah secara biologis. Sebaliknya, metode biologis memanfaatkan mikrobioma tanah, yang dapat meningkatkan ketersediaan nutrisi melalui produksi fitohormon, fiksasi nitrogen, dan pelarutan fosfat. Metode mekanis tidak dapat memberikan perlindungan berkelanjutan terhadap patogen. Sebaliknya, mikroorganisme seperti *Trichoderma* sp., *Bacillus subtilis*, dan *Azotobacter* sp. telah terbukti menghasilkan zat antimikroba dan antibiosis yang melindungi tanaman dari penyakit sejak tahap perkecambahan. Pertanian modern memerlukan metode yang tidak hanya mengutamakan hasil jangka pendek tetapi juga mempertimbangkan keberlanjutan lingkungan dan tanah. Metode mekanis seringkali mengabaikan keseimbangan ekologi tanah, namun pendekatan biologis melalui mikrobioma dapat mendukung keseimbangan ini.

Berdasarkan dari perumusan masalah, teori yang ada, serta penelitian sebelumnya yang berkaitan, maka pembahasan dari *literature review* ini mengenai peran mikrobioma tanah dalam mempengaruhi perkecambahan sebagai faktor pendukung pertanian berkelanjutan:

1. Perkecambahan

Perkecambahan merupakan tahap krusial dalam siklus hidup tanaman berbiji yang

sangat dipengaruhi oleh faktor ekstremal seperti ketersediaan air dan perlakuan awal terhadap biji. Dimana embrio mulai tumbuh setelah proses imbibisi atau penyerapan air, imbibisi inilah yang menjadi pemicu utama dimulainya kembali aktivitas embrio (Hidayat, 1985). Sementara itu struktur biji dan teknik perlakuan seperti perendaman dengan larutan H_2SO_4 turut menentukan keberhasilan proses tersebut. Kecambah pada umumnya menunjukkan pertumbuhan akar yang cukup baik, dengan perkembangan hipokotil yang optimal serta daun yang tampak hijau dan sehat (Tamin, 2007). Selain itu, penggunaan larutan asam sulfat (H_2SO_4), dalam proses perkecambahan dapat mempengaruhi daya serap benih, yang dipengaruhi oleh teknik perlakuan serta durasi perendaman yang dilakukan. Kecambah yang memiliki ciri-ciri yang baik seperti sistem perakaran yang berkembang, hipokotil yang sempurna, dan daun hijau inilah yang menunjukkan tahap awal dari keberhasilan pertumbuhan tanaman.

2. Mikrobioma Tanah

Kajian biologi tanah dapat dilakukan melalui eksplorasi mikroba di wilayah rizosfer, yaitu zona tanah yang dipengaruhi oleh fase pertumbuhan tanaman karena akar melepaskan eksudat yang berbeda-beda pada setiap fase, sehingga mempengaruhi kelimpahan dan keragaman mikroba. Mikroba ini sangat penting karena turut menentukan ketersediaan nutrisi, pengendalian penyakit, dan pembentukan senyawa yang mendukung pertumbuhan tanaman. Mikrobioma tanah mencakup berbagai mikroorganisme seperti bakteri, fungi, virus, dan protozoa yang berperan penting dalam mendukung kesuburan lahan dan juga memperkuat daya tahan tanaman terhadap penyakit dan kondisi lingkungan. Studi yang dilakukan pada rizosfer nenas menemukan mikroba seperti *Fusarium* sp., *Burkholderia* sp., dan *Azospirillum* sp., yang diketahui menghasilkan hormon dan asam organik yang membantu pertumbuhan tanaman (Weber *et al.*, 2010).

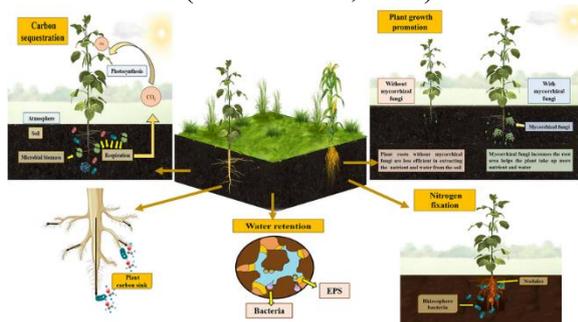
Kelimpahan dan variasi mikroba di rizosfer dipengaruhi oleh berbagai faktor. Salah satu di antaranya adalah tahap pertumbuhan tanaman yang menentukan jenis dan jumlah eksudat akar yang disekresikan. Eksudat akar adalah sumber nutrisi utama bagi mikroorganisme tanah, sehingga keberadaannya sangat memengaruhi dinamika komunitas mikroba di sekitar akar tanaman (Campbell,

1985). Sebagai bakteri penambat nitrogen (N_2), *Azotobacter* lebih banyak ditemukan pada fase vegetatif tanaman karena fotosintesis meningkat, yang mendorong sekresi asam amino, yang diperlukan untuk proses penambatan nitrogen (Campbell, 1985). Selain itu, ditemukan bahwa ada korelasi antara kelimpahan mikroba rizosfer dan tingkat produktivitas tanaman. Lahan yang memiliki hasil tinggi umumnya memiliki kualitas tanah yang lebih subur, yang mendukung aktivitas mikroba secara optimal (Kao-Kniffin & Balsler, 2008). Aktivitas mikroba ini kemudian berkontribusi pada peningkatan pertumbuhan dan hasil tanaman (Kamaruzzaman *et al.*, 2020). Ketika dibandingkan dengan lahan yang memiliki produktivitas tinggi, lahan dengan produktivitas rendah memiliki populasi mikroba fungsional seperti bakteri kitinolitik, bakteri pelarut kalium, *Azotobacter*, dan bakteri pelarut fosfat yang lebih tinggi (Kamaruzzaman *et al.*, 2020).

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa bakteri rizosfer menghasilkan hormon pertumbuhan IAA, juga dikenal sebagai *indole-3-acetic acid*, yang dapat mendorong perkembangan akar dan meningkatkan daya tahan tanaman terhadap serangan patogen, terutama selama fase vegetatif (Yu *et al.*, 2018). Tetapi terlalu banyak bakteri penghasil IAA juga dapat berbahaya. Ini karena mereka dapat berfungsi sebagai rizosfer bakteri yang berbahaya (DRB), yang merugikan tanaman (Peng *et al.*, 2020). Sebaliknya, melalui mekanisme pengendalian hayati, bakteri rizosfer yang mampu menghasilkan bahan antibiotik menjaga tanaman dari berbagai infeksi patogen tanah (Ahemad & Kibret, 2014). Hal ini menjadikan produksi antibiotik sebagai cara utama dalam pengendalian penyakit menular tanah.

Rekayasa lingkungan yang mendukung pertumbuhan tanaman, salah satunya melalui pemanfaatan mikroba, diperlukan untuk menghasilkan benih cengkeh berkualitas tinggi (Suherman, 2010). Penggunaan mikroba dalam bentuk konsorsium dapat mengurangi kemungkinan kegagalan aplikasi di lapangan. Dengan bantuan mikroba yang mendorong pertumbuhan tanaman, hasil panen dapat ditingkatkan, terutama di wilayah di mana perubahan iklim memengaruhi kesehatan tanah. Mereka berfungsi dengan beberapa cara, seperti membantu konversi nitrogen atmosfer menjadi bentuk yang dapat digunakan oleh bakteri yang memiliki kemampuan fiksasi nitrogen,

meningkatkan penyerapan nutrisi dengan bantuan jamur seperti mikoriza, dan menghasilkan hormon mikroba yang mempromosikan pertumbuhan tanaman, seperti asam indol-3-asetat (IAA). Mikroba ini juga penting untuk pertumbuhan tanaman karena peran mereka dalam penyerapan nutrisi, fiksasi nitrogen, dan produksi hormon mikroba. Kesehatan tanah, kapasitas penahan air tanah, dan pertumbuhan tanaman dapat ditingkatkan dengan memahami dan mengelola komunitas mikroba tanah (Kumari *et al.*, 2023).



Gambar 1 Mengubah mikrobioma tanah untuk mengurangi dampak merugikan perubahan iklim
Sumber : (Jansson & Hofmockel, 2020)

Bakteri *Azotobacter* sp. membantu pertumbuhan tanaman dengan menghasilkan fitohormon seperti giberelin, sitokinin, dan asam indol asetat, yang meningkatkan pertumbuhan akar (Rahmi, 2014). Selain itu, bakteri ini juga menghasilkan banyak senyawa penting seperti pridoksin, tiamin, riboflavin, nikotin, sianokobalamin, asam pentotenat, dan senyawa antimikroba yang membantu perkecambahan benih (Rahmi, 2014).

Lactobacillus sp. menghasilkan bakteriosin dan asam laktat, yang membantu pencernaan tanaman dan penyerapan nutrisi (Jannah *et al.*, 2018). *Lactobacillus* sp. juga menguraikan senyawa organik, menyuburkan tanah, dan *Bacillus subtilis* mengatasi ikatan logam dengan membuat biofilm dan siderofor (Rizzi *et al.*, 2019).

Trichoderma sp., mikroba tanah dominan, mengontrol patogen melalui berbagai cara, termasuk parasitisme dan antibiosis. Selain itu digunakan untuk mengubah bahan organik tanah yang meningkatkan kandungan unsur hara seperti nitrogen (N), fosfor (P), sulfur (S), dan magnesium (Mg), serta memberikan elemen penting lainnya yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman.

Aplikasi *Gliocladium* sp. di permukaan daun (*phyllosphere*) meningkatkan klorofil

tanaman. *Gliocladium* sp. juga dapat menyesuaikan diri dengan lingkungan tanaman dan menghasilkan metabolit seperti asam lemak dan lipid lainnya dengan menggunakan hasil ekstraksi kultur cairnya untuk meniru profil kimia tanaman. Lipid ini memainkan peran penting dalam pensinyalan hormon sitokinin, suatu hormon tumbuhan yang membantu perkembangan kloroplas dan sintesis klorofil yang mendukung fotosintesis tanaman secara keseluruhan (Herlina, 2013).

Beauveria bassiana merupakan cendawan anamorfik yang hidup di seluruh dunia, dapat menginfeksi ratusan spesies serangga yang bermigrasi ke permukaan tanaman melalui angin. Konidianya menempel pada filosfer tanpa berinteraksi langsung dengan tanaman, tetapi berinteraksi aktif dengan serangga migran tersebut (Meyling & Eilenberg, 2006). Sebagaimana ditunjukkan oleh temuan penelitian sebelumnya, cendawan ini berfungsi sebagai entomopatogen terhadap hama seperti kutu tempurung (*Coccus viridis*) dan kutu daun (*Aphis gossypii*), dan mereka memiliki kemampuan untuk mengganggu penyerapan cahaya dan menghentikan fotosintesis (Rismayani *et al.*, 2020).

Beauveria bassiana mengurangi serangan kedua jenis kutu tersebut pada tanaman, terutama pada bibit muda yang batangnya masih lunak dan mudah terserang karena lebih mudah menyerap cairan dan memberikan nutrisi kepada hama. Ini menyebabkan tanaman tumbuh kerdil, daun lambat berkembang, kekeringan dan kelayuan pada akhirnya. Selain itu, kedua jenis kutu tersebut mengeluarkan embun madu, yang menarik semut dan menyebabkan embun jelaga berwarna hitam terbentuk pada permukaan daun. Penutupan permukaan daun mengurangi kemampuan tanaman untuk menyerap cahaya, sehingga menghambat proses fotosintesis. Hasil penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa cara terbaik untuk mendukung respons fisiologis bibit cengkeh adalah dengan menggunakan 8 mL mikroba *Azotobacter* sp., *Lactobacillus* sp., *Bacillus subtilis*, dan *Trichoderma* sp. pada wilayah rizosfer dan 6 mL mikroba *Gliocladium* sp. dan *Beauveria bassiana* pada wilayah filosfer tanaman (Rezkiiana *et al.*, 2021).

Salah satu metode untuk meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk kimia dengan pendekatan yang lebih ramah lingkungan adalah melalui pemakaian pupuk hayati. Pupuk hayati adalah produk biologis aktif yang terdiri dari

mikroorganisme hidup, baik dalam bentuk tunggal maupun konsorsium, yang memiliki kemampuan untuk meningkatkan efisiensi pemupukan, kesuburan, dan kesehatan tanah secara keseluruhan (Leiwakabessy *et al.*, 2018). Bakteri inokulan membantu penyediaan hara untuk tanaman secara alami. Ini termasuk bakteri seperti *Rhizobium*, *Azospirillum*, *Bacillus* sp., *Burkholderia* sp., *Azotobacter*, bakteri pelarut fosfat, bakteri penambat nitrogen, Mikoriza, *Trichoderma* sp., dan jenis mikroba lainnya (Pieterse *et al.*, 2014).

Berdasarkan hasil identifikasi mikroba dari MOL (Mikroorganisme Lokal), diketahui bahwa jenis mikroba seperti *Bacillus cereus* dan *Lysinibacillus* sp. memiliki potensi tinggi untuk berfungsi sebagai pupuk hayati. Ini karena mereka dapat mendukung pertumbuhan tanaman dan memiliki ketahanan terhadap patogen (Suryadi *et al.*, 2013). Isolat 1A-2 *Bacillus thuringiensis*, yang memiliki tingkat homologi 99,65%, berfungsi sebagai bioinsektisida dan biofungisida yang efektif untuk melawan hama seperti *Ostrinia furnacalis*. Yang dilakukan dengan menghasilkan enzim kitinase dan metabolit sekunder yang dapat menghentikan miselium dan koloni jamur berkembang (Suryadi *et al.*, 2013). Selain itu, terbukti bahwa *Bacillus cereus* mampu menghentikan pertumbuhan jamur melalui mekanisme yang berfokus pada kitin pada dinding sel jamur (Suryadi *et al.*, 2013). Menurut penelitian lain, *Bacillus subtilis* dan *Lysinibacillus* sp. dapat membantu melindungi tanaman melalui mekanisme ketahanan sistemik terhadap patogen (Leiwakabessy *et al.*, 2018). Hal ini menunjukkan bahwa agen hayati yang potensial untuk sistem pertanian berkelanjutan.

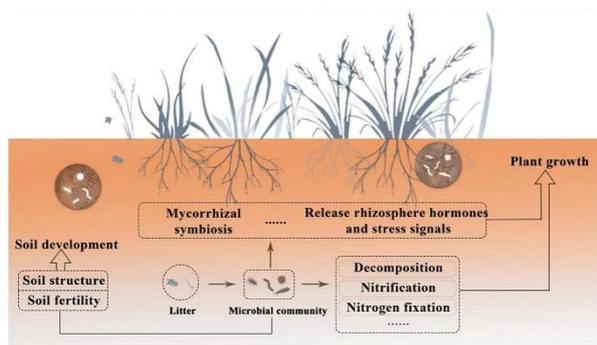
Pupukan hayati cair atau disebut juga Mikrobat yang dibuat dengan menggunakan bioteknologi modern dimaksudkan untuk mendukung sistem pertanian organik. Produk ini merupakan hasil dari perpaduan pupuk hayati dan fungisida hayati yang mengandung berbagai jenis mikroorganisme yang bekerja sama untuk memperbaiki kesuburan tanah, meningkatkan pertumbuhan tanaman, dan meningkatkan hasil pertanian, khususnya tanaman padi. *Azotobacter* sp., *Pseudomonas* sp., dan *Lactobacillus* sp. adalah mikroba fungsional yang meningkatkan ketersediaan unsur hara dan merangsang pertumbuhan akar. Selain itu, *Paenibacillus polymyxa* dan *Streptomyces* sp. memperkaya mikroba dan bertindak sebagai pengendali hayati patogen penyebab penyakit tular tanah,

dan menjaga kesehatan tanaman. Semua mikroorganisme ini termasuk dalam kelompok rizobakteri yang mendorong pertumbuhan tanaman (PGPR). Bakteri-bakteri ini bersifat aktif dan memiliki kemampuan untuk mengkolonisasi area rizosfer untuk mendukung pertumbuhan tanaman secara optimal (Baharuddin *et al.*, 2019).

Bakteri pelarut fosfat *Pseudomonas* sp. dapat mempercepat pertumbuhan tanaman dan melawan patogen tanaman secara biokontrol (Sumarni *et al.*, 2015) Bakteri antagonis *Penibacillus polymyxa* menghasilkan antibiotik seperti polimiksin, yang berfungsi untuk menghentikan pertumbuhan patogen penyebab penyakit tanaman. Adapun *Streptomyces* sp., juga menghasilkan antibiotik yang juga dapat berperan dalam menghambat suatu patogen, selain itu bakteri ini juga mampu memfikasi nitrogen sehingga pertumbuhan tanaman meningkat (Kantikowati *et al.*, 2018).

Kelompok bakteri *Rhizobacterium Plant Growth Promoting* (PGPR) merupakan bakteri yang hidup pada akar tanaman. Bakteri PGPR memproduksi fitohormon seperti IAA, sitokinin, dan giberelin serta bertindak sebagai agen biokontrol terhadap patogen (Jamil *et al.*, 2020). Selain itu, bakteri PGPR memiliki kemampuan untuk fiksasi nitrogen, menghasilkan hormon pertumbuhan, dan melindungi tanaman dari patogen. Sebagai mikroba akar, PGPR melakukan tiga fungsi penting untuk membantu pertumbuhan tanaman. Pertama, ia mensintesis dan mengontrol konsentrasi fitohormon seperti asam indol asetat (IAA), giberelin, sitokinin, dan etilen di lingkungan perakaran; kedua, ia menyediakan hara dengan mengikat nitrogen dari udara dan melarutkan fosfor dalam tanah; dan ketiga, ia berfungsi sebagai bioprotektan dengan menghasilkan metabolit antipatogen seperti siderofor, β -1,3-glukanase, kitinas (Jamil *et al.*, 2020).

Adapun mekanisme mikroba dalam membantu proses perkecambahan tumbuhan dapat dilihat dari skema sebagai berikut:



Gambar 2 Diagram skematik hubungan antara mikroorganisme tanah, tumbuhan, dan tanah.

Sumber: (Wang *et al.*, 2024)

a). Produksi Fitohormon (Giberelin dan Auksin)

Azotobacter sp. memproduksi hormon-hormon tanaman seperti giberelin dan auksin. Giberelin memiliki peranan dalam merangsang sel untuk membelah dan memanjang, serta mengatur berbagai proses fisiologis seperti pertumbuhan batang, pembungaan, perkecambahan biji, dan penghilangan dormansi. Auksin juga berkontribusi pada pertumbuhan akar dan tunas.

b). Produksi Vitamin dan Zat Perangsang Tumbuh

Mikroba ini menghasilkan berbagai jenis vitamin seperti thiamin, riboflavin, piridoksin, sianokobalamin, nikotin, serta senyawa-senyawa seperti asam indol asetat dan giberelin. Senyawa-senyawa ini berfungsi dalam meningkatkan aktivitas metabolisme biji, yang mendukung proses perkecambahan serta penghilangan dormansi.

c). Produksi Senyawa Antimikroba

Azotobacter sp. juga dikenal memproduksi senyawa antibiotik dan anti jamur yang mampu mengendalikan penyakit pada tanaman. Hal ini penting untuk melindungi biji dari infeksi patogen selama proses perkecambahan, sehingga meningkatkan keandalan dan kesehatan biji (Rahmi, 2014).

KESIMPULAN

Dari kajian literatur yang telah dilakukan dapat penulis simpulkan bahwa perkecambahan adalah tahap awal yang sangat penting dalam siklus hidup tanaman berbiji. Tahap ini dipengaruhi oleh faktor eksternal seperti ketersediaan air, struktur biji, dan perlakuan awal benih, seperti perendaman dengan larutan asam sulfat (H_2SO_4). Aktivasi embrio dipicu oleh proses imbibisi. Selanjutnya, perkembangan akar, hipokotil, dan daun dimulai

sebagai tanda keberhasilan perkecambahan. Selain itu, mikrobioma tanah, terutama mikroba di bagian rizosfer dan filosfer tanaman, sangat penting untuk mendukung pertumbuhan dan ketahanan tanaman terhadap pengaruh biotik dan abiotik. Mikroorganisme seperti *Azotobacter* sp., *Bacillus subtilis*, *Lactobacillus* sp., *Trichoderma* sp., *Gliocladium* sp., dan *Beauveria bassiana* melakukan berbagai tugas, termasuk penambatan nitrogen, pelarutan fosfat dan kalium, produksi fitohormon, dan perlindungan hayati terhadap patogen dan serangga hama. Selain itu, aktivitas mikroba ini memengaruhi efisiensi fotosintesis dengan meningkatkan pembentukan klorofil dan mengontrol penyerapan dan distribusi unsur hara penting seperti nitrogen (N), kalium (K), magnesium (Mg), dan besi (Fe). Pemanfaatan pupuk hayati berbasis mikroba terbukti menjadi strategi berkelanjutan dalam meningkatkan produktivitas pertanian, kesuburan tanah, dan pertumbuhan tanaman yang optimal. Dengan demikian, integrasi antara perlakuan benih dan rekayasa mikrobioma tanah secara sinergis dapat menjadi pendekatan efektif dalam menghasilkan benih tumbuhan berkualitas tinggi serta mendukung pertanian yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

DAFTAR RUJUKAN

- Advinda, L. (2020). *Pseudomonad Fluoresen Agens Biokontrol Blood Disease Bacteria (BDB) Tanaman Pisang*. Deepublish.
- Ahemad, M., & Kibret, M. (2014). Mechanisms and applications of plant growth promoting rhizobacteria: Current perspective. *Journal of King Saud University - Science*, 26(1), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2013.05.001>
- Ashrafuzzaman, M., Hossen, F. A., M. Razi Ismail, Hoque, M. A., Islam, M. Z., Shahidullah, S. M., & Meon, S. (2009). Efficiency of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of rice growth. *African Journal of Biotechnology*, 8(7), 1247–1252.
- Baharuddin, B., Ikhwan, A., Kuswinanti, K., & Tutik, T. (2019). *Pupuk Organik Cair Berbahan Aktif Konsorsium Lima Bakteri Dan Proses Pembuatannya*.
- Bandyopadhyay, P., Bhuyan, S. K., Yadava, P. K., Varma, A., & Tuteja, N. (2017). Emergence of plant and rhizospheric microbiota as stable interactomes.

- Protoplasma*, 254(2), 617–626.
<https://doi.org/10.1007/s00709-016-1003-x>
- Campbell, R. (1985). *Plant Microbiology*. Britain (UK): The Castlefield Press.
- Dita, L. A., & Simarmata, T. (2024). *Literature Review : Rekayasa Mikrobioma Rizosfer untuk Meningkatkan Kesehatan Tanah dan Produktivitas Tanaman Pangan dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan Literature Review : Rhizosphere Microbiome Engineering to Improve Soil Health and Crop Productivity*.
- Haney, C. H., & Ausubel, F. M. (2015). Plant microbiome blueprints. *Science*, 349(6250), 788–789.
<https://doi.org/10.1126/science.aad0092>
- Herlina, L. (2013). Uji Potensi Gliocladium sp Terhadap Pertumbuhan Dan Produksi Tanaman Tomat. *Journal of Biology & Biology Education*, 5(2), 88–93.
- Hidayat, O. D. (1985). *Morfologi Tanaman Kedelai* (Puslitbang).
- Irawan, N., Pranita, S. D., Edelwis, T. W., Pardi, H., & Ramadhani, S. Y. (2024). The Role Of Bacteria In Microplastic Bioremediation And Implications For Marine Ecosystems. *BIO Web of Conferences*, 134, 1–9.
<https://doi.org/10.1051/bioconf/202413405009>
- Jamil, H., Zainal, Yunus, M., Baharuddin, & Tuwo, M. (2020). Aplikasi Pupuk Hayati Mikrobat Untuk Meningkatkan Produktivitas Pertanaman Padi Desa Bulu Allaporenge Kabupaten Bone. *Ilmu Alam Dan Lingkungan*, 11(1), 10–15.
- Jannah, M., Junaidi, M., Setyowati, D. N., & Azhar, F. (2018). Pengaruh Pemberian Lactobacillus sp. dengan Dosis yang Berbeda terhadap Sistem Imun Udang Vaname (*Litopenaeus vannamei*) yang diinfeksi Bakteri Vibrio parahaemolyticus. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 11(2), 140.
<https://doi.org/10.21107/jk.v11i2.3980>
- Jansson, J. K., & Hofmockel, K. S. (2020). Soil microbiomes and climate change. *Nature Reviews Microbiology*, 18(1), 35–46.
<https://doi.org/10.1038/s41579-019-0265-7>
- Jousset, A., & Lee, S.-W. (2023). Coming of age for the rhizosphere microbiome transplantation. *Soil Ecology Letters*, 5(1), 4–5. <https://doi.org/10.1007/s42832-022-0151-5>
- Kamaruzzaman, M. A., Abdullah, S. R. S., Hasan, H. A., Hassan, M., Othman, A. R., & Idris, M. (2020). Characterisation of Pb-resistant plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) from Scirpus grossus. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 23, 101456.
<https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101456>
- Kantikowati, E., Haris, R., & Anwar, S. (2018). Aplikasi Agen Hayati (*Paenibacillus polymixa*) terhadap Penekanan Penyakit Hawar Daun Bakteri Serta Hasil dan Pertumbuhan Padi Hitam (*Oryza sativa*) Var. Lokal. *Paspalum: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 6(2), 134.
<https://doi.org/10.35138/paspalum.v6i2.97>
- Kao-Kniffin, J., & Balsler, T. C. (2008). Soil Fertility and the Impact of Exotic Invasion on Microbial Communities in Hawaiian Forests. *Microbial Ecology*, 56(1), 55–63.
<https://doi.org/10.1007/s00248-007-9323-1>
- Karlen, D. L., Hurley, E. G., Andrews, S. S., Cambardella, C. A., Meek, D. W., Duffy, M. D., & Mallarino, A. P. (2006). Crop Rotation Effects on Soil Quality at Three Northern Corn/Soybean Belt Locations. *Agronomy Journal*, 98(3), 484–495.
<https://doi.org/10.2134/agronj2005.0098>
- Khasani, I. (2010). Pemanfaatan Bioteknologi Berbasis Mikroorganisme Guna Mendukung Peningkatan Produktivitas Perikanan Nasional. *Media Akuakultur*, 5(1), 22.
<https://doi.org/10.15578/ma.5.1.2010.22-31>
- Koza, N., Adedayo, A., Babalola, O., & Kappo, A. (2022). Microorganisms in Plant Growth and Development: Roles in Abiotic Stress Tolerance and Secondary Metabolites Secretion. *Microorganisms*, 10(8), 1528.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms10081528>
- Kumari, A., Dash, M., Singh, S. K., Jagadesh, M., Mathpal, B., Mishra, P. K., Pandey, S. K., & Verma, K. K. (2023). Soil microbes: a natural solution for mitigating the impact of climate change.

- Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12), 1436.
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-11988-y>
- Leiwakabessy, C., Sinaga, M. S., Mutaqien, K. H., Trikoesoemaningtyas, T., & Giyanto, G. (2018). The Endophytic Bacteria, Salicylic Acid, and their Combination as Inducers of Rice Resistance Against *Xanthomonas oryzae* pv. *oryzae*. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science*, 40(1).
<https://doi.org/10.17503/agrivita.v40i1.1029>
- Martin, B. D., & Schwab, E. (2012). Current Usage of Symbiosis and Associated Terminology. *International Journal of Biology*, 5(1).
<https://doi.org/10.5539/ijb.v5n1p32>
- Meyling, N. V., & Eilenberg, J. (2006). Isolation and characterisation of *Beauveria bassiana* isolates from phylloplanes of hedgerow vegetation. *Mycological Research*, 110(2), 188–195.
<https://doi.org/10.1016/j.mycres.2005.09.008>
- Mhlongo, M. I., Piater, L. A., Madala, N. E., Labuschagne, N., & Dubery, I. A. (2018). The Chemistry of Plant–Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Potential for Metabolomics to Reveal Signaling Related to Defense Priming and Induced Systemic Resistance. *Frontiers in Plant Science*, 9.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00112>
- Peng, H., De-Bashan, L. E., Bashan, Y., & Higgins, B. T. (2020). Indole-3-acetic acid from *Azospirillum brasilense* promotes growth in green algae at the expense of energy storage products. *Algal Research*, 47, 101845.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.101845>
- Pieterse, Zamioudis, C., Berendsen, R., Weller, D., Van Wees, S., & Bakker, P. (2014). Resistensi sistemik yang diinduksi oleh mikroba yang menguntungkan. *Tinjauan Tahunan Dari Fitopatologi*, 52, 347–375.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-082712-102340>
- Rahmi, R. (2014). Kajian Efektifitas Mikroba *Azotobacter* Sp. Sebagai Pemacu Pertumbuhan Tanaman Kakao (*Theobroma cacao* L.). *Journal Galung Tropika*, 3(2).
<https://doi.org/10.31850/jgt.v3i2.77>
- Rezkiyana, N., Musa, Y., Nasaruddin, Ridwan, I., & Kurniawan. (2021). Physiological responses of clove seedlings applied with different microbial consortium in the rhizosphere and phyllosphere. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 807(4).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/807/4/042041>
- Rismayani, R., Rubiyo, R., Ibrahim, D., & Sari, M. (2020). Dinamika Populasi Kutu Tempurung (*Coccus viridis*) Dan Kutu Daun (*Aphis gossypii*) Pada Tiga Varietas Kopi Arabika (*Coffea arabica*). *Jurnal Penelitian Tanaman Industri*, 19(4), 159.
<https://doi.org/10.21082/jlitri.v19n4.2013.159-166>
- Rizzi, A., Roy, S., Bellenger, J.-P., & Beauregard, P. B. (2019). Iron Homeostasis in *Bacillus subtilis* Requires Siderophore Production and Biofilm Formation. *Applied and Environmental Microbiology*, 85(3).
<https://doi.org/10.1128/AEM.02439-18>
- Saputro, A. S., & Hadiyanti, N. (2023). Pembuatan Nitrobacter untuk Pertanian Berkelanjutan. *JATIMAS : Jurnal Pertanian Dan Pengabdian Masyarakat*, 3(2), 84–98.
<https://doi.org/10.30737/jatimas.v3i2.5098>
- Saraswati, R., & Sumarno. (2008). Pemanfaatan Mikroba Penyubur Tanah Sebagai Komponen Teknologi Pertanian. *Iptek Tanaman Pangan*, 3(1), 41–58.
- Situngkir, N. C., Sudana, I. M., & Singarsa, I. D. P. (2021). Pengaruh Jenis Bakteri PGPR dalam Beberapa Jenis Media Pembawa untuk Meningkatkan Pertumbuhan dan Ketahanan Tanaman Padi Beras Merah Lokal Jatiluwih terhadap Penyakit. *Jurnal Agroekoteknologi Tropika*, 10(2), 233.
<https://ojs.unud.ac.id/index.php/JAT>
- Suherman, C. (2010). *Pertumbuhan Bibit Cengkeh (Eugenia aromatica O.K) Kultivar Zanzibar Yang Diberi Fungi Mikoriza Arbuskula Dan Pupuk Majemuk Npk*.
- Sumarni, Aiyen, & Panggeso, J. (2015). *Pseudomonas* Sp. Strain Dsmz 13134 Dan Efektivitasnya Pada Pertumbuhan Tanaman Tomat (*Lycopersicon esculentum* mill.) Serta Serapan P Pada Tanah Masam. *E-J. Agrotekbis*, 3(3),

- 338–344.
- Suryadi, Y., Priyatno, T. P., Susilowati, D. N., Samudra, I. M., Yudhistira, N., & Purwakusumah, E. D. (2013). Isolasi dan Karakterisasi Kitinase asal *Bacillus cereus* 11 UJ (Isolation and Chitinase Characterization of *Bacillus cereus* 11 UJ). *Jurnal Biologi Indonesia*, 9(1), 51–62.
- Tamin, R. P. (2007). Teknik perkecambahan benih jati (*Tectona grandis* Linn. F.). *Jurnal Agronomi*, 11(1), 7–14.
- Ulfa, A., Akbar, M., Ali, M., & Akbar, J. (2019). Difusi Produk Bioteknologi “Probiotik” Untuk Meningkatkan Produksi Ternak Ruminansia di Desa Lelede Kecamatan Kediri, Lombok Barat. *Jurnal Gema Ngabdi*, 1(2), 56–64. <https://doi.org/10.29303/jgn.v1i2.17>
- Wang, X., Chi, Y., & Song, S. (2024). Important soil microbiota’s effects on plants and soils: a comprehensive 30-year systematic literature review. *Frontiers in Microbiology*, 15. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.13477>
- 45
- Weber, O. B., Lima, R. N., Crisóstomo, L. A., Freitas, J. A. D., Carvalho, A. C. P. P., & Maia, A. H. N. (2010). Effect of diazotrophic bacterium inoculation and organic fertilization on yield of Champaka pineapple intercropped with irrigated sapota. *Plant and Soil*, 327(1–2), 355–364. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0059-1>
- Yu, Z., Pei, H., Jiang, L., Hou, Q., Nie, C., & Zhang, L. (2018). Phytohormone addition coupled with nitrogen depletion almost tripled the lipid productivities in two algae. *Bioresource Technology*, 247, 904–914. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.192>