

Literature Review: Rekayasa Mikrobioma Rizosfer untuk Meningkatkan Kesehatan Tanah dan Produktivitas Tanaman Pangan dalam Mendukung Pertanian Berkelanjutan

Limbong Agatha Dita^{1*)}, Tualar Simarmata²⁾

¹⁾ Program Studi Magister Ilmu Tanah, Program Pascasarjana, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Jalan Raya Bandung Sumedang Km 21 Jatinangor, Sumedang 45363, Indonesia

²⁾ Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian Universitas Padjadjaran. Jalan Raya Bandung Sumedang Km 21 Jatinangor, Sumedang 45363, Indonesia.

* Koresponden: limbong20002@mail.unpad.ac.id

ABSTRAK

Dampak dari intensifikasi pertanian tanpa memperhatikan kelestarian lahan pertanian sehingga lahan menjadi tidak produktif, padahal kebutuhan pangan semakin lama semakin meningkat. Artikel ini bertujuan untuk mengungkapkan kemampuan dari rekayasa mikrobioma rizosfer dalam meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas tanaman pangan serta mengetahui hambatan dan peluang dari mikrobioma rizosfer dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Metode penelitian yang digunakan adalah *Narrative Literature Review*. Rekayasa mikrobioma rizosfer dapat meningkatkan populasi mikroba menguntungkan dengan mengurangi input kimia, tetapi tetap efektif dalam meningkatkan produktivitas tanaman pangan dan kesehatan tanah serta berperan dalam mendukung pertanian berkelanjutan. Penggunaan pupuk dan pestisida harus diatur dengan bijak agar tidak merusak mikrobioma rizosfer dan nutrisi tanah tetap terjaga.

Kata Kunci : mikroba, mikrobioma, pertanian berkelanjutan

Literature Review: Rhizosphere Microbiome Engineering to Improve Soil Health and Crop Productivity in Support of Sustainable Agriculture

ABSTRACT

The impact of agricultural intensification without considering the sustainability of agricultural land has led to land becoming unproductive, even though the demand for food continues to increase. This article aims to reveal the ability of rhizosphere microbiome engineering to enhance soil health and crop productivity, as well as to identify the obstacles and opportunities of the rhizosphere microbiome in supporting sustainable agriculture. The research method used is a *Narrative Literature Review*. Rhizosphere microbiome engineering can increase the population of beneficial microbes while reducing chemical inputs, yet remains effective in improving crop productivity and soil health, thus supporting sustainable agriculture. The use of fertilizers and pesticides must be wisely regulated to avoid damaging the rhizosphere microbiome and to maintain soil nutrition.

Keywords : microbes, microbiome, sustainable agriculture

PENDAHULUAN

Berdasarkan laporan dari para ahli, diperkirakan bahwa pada tahun 2050 akan terjadi peningkatan permintaan produksi pertanian sebesar 70%^[1]. Kebutuhan pangan dunia semakin lama semakin meningkat, tetapi lahan di dunia semakin rusak akibat dari dampak pertanian intensif tanpa

memperhatikan kelestarian lingkungan sehingga lahan suboptimal semakin luas. Hal tersebut dapat menyebabkan terjadinya penurunan produktivitas dari tanaman pangan. Untuk mengatasi permasalahan itu dapat dilakukan dengan pendekatan pertanian ramah lingkungan dengan memanfaatkan mikrobioma menguntungkan untuk

mendukung kesehatan tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman pangan.

Mikrobioma dapat didefinisikan sebagai semua mikroba dari suatu komunitas yang terkait dengan tanaman yang dapat hidup, berkembang, dan juga berinteraksi dengan jaringan tanaman, seperti pada akar, pucuk, daun, bunga, dan biji^[2]. Mikrobioma dapat terdiri dari beberapa jenis organisme yang berbeda, seperti jamur, bakteri, virus, protozoa, dan lainnya. Mikrobioma ini memiliki berbagai peran penting yang menguntungkan bagi tanaman, seperti meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman, melindungi tanaman dari ancaman patogen, meningkatkan kesehatan tanah dan tanaman^[3]. Pertanian berkelanjutan telah menjadi prioritas utama dalam upaya menjaga lingkungan dan memastikan pasokan pangan yang cukup untuk populasi dunia yang terus bertambah. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah rekayasa mikrobioma rizosfer, yang melibatkan manipulasi mikroorganisme yang hidup di sekitar akar tanaman.

Rizosfer merupakan lingkungan yang penting dalam pertumbuhan tanaman karena mengandung banyak sekali mikroba yang terlibat bagi pertumbuhan tanaman. Interaksi antara mikroba rizosfer dengan tanaman sangat beragam dan dapat digolongkan sebagai interaksi positif dan negatif^[4]. Beberapa mikroba rizosfer dapat menghasilkan interaksi positif dengan tanaman, yaitu rhizobia, *Plant Growth Promote Rhizobacteria* (PGPR), *Plant Growth Promote Fungi*, dan mikoriza yang dapat bermanfaat bagi tanaman, yaitu sebagai biostimulan, menyediakan nutrisi, perlindungan dari penyakit, peningkatan kesehatan tanah, dan adaptasi terhadap cekaman kekeringan.

Rizosfer merupakan suatu wilayah sekitar perakaran yang dicirikan dengan keanekaragaman spesies mikroba yang lebih rendah tetapi kelimpahan dan aktivitas mikrobanya lebih intens^[5]. Kumpulan mikrobioma di rizosfer sangat dipengaruhi pada metabolit yang berasal dari tanaman,

yaitu eksudat akar yang merupakan kunci dalam pembentukan rizosfer. Tanaman memiliki lingkungan rizosfer yang selektif sehingga komunitas mikroba akan berbeda sesuai dengan jenis tanamannya. Beberapa dari molekul kemotaktik atau sinyal dalam eksudat akar dapat mengatur perubahan komposisi mikroba sehingga mengarahkan tanaman untuk memilih dan mendukung kumpulan mikroba rizosfer yang menguntungkan^[6].

Mikroba rizosfer yang menguntungkan bagi tanaman ini dapat menjadi komponen yang signifikan, khususnya dalam mendukung pertanian ramah lingkungan. Banyaknya populasi bakteri, cendawan, dan mikroba lain pada mikrobioma rizosfer dapat membentuk kumpulan genetik dan menunjukkan karakter yang menguntungkan sehingga mendukung pertumbuhan dan kesehatan tanaman pangan. Oleh sebab itu, rekayasa mikrobioma rizosfer dalam bidang pertanian ramah lingkungan sangat dibutuhkan karena mikroba pada mikrobioma rizosfer dapat mengatasi masalah mendasar pada tanaman, seperti menyediakan unsur hara untuk peningkatan produksi tanaman, menginduksi tanaman agar tahan pada cekaman lingkungan, serta mendukung pengurangan penggunaan pupuk kimia sehingga kesehatan tanah dapat ditingkatkan^[7].

Artikel ini ditujukan untuk mengungkapkan kemampuan dari rekayasa mikrobioma rizosfer dalam meningkatkan kesehatan tanah dan produktivitas tanaman pangan serta mengetahui hambatan dan peluang dari mikrobioma rizosfer dalam mendukung pertanian berkelanjutan.

BAHAN DAN METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian kualitatif dengan jenis penelitian *narrative literature review*. *Narrative literature review* merupakan jenis penelitian kualitatif melalui serangkaian kegiatan yang berhubungan dengan pengumpulan data pustaka, membaca, menulis, dan mengumpulkan berbagai bahan

penelitian^[8]. Metode ini bertujuan untuk menyusun sebuah rangkuman atau tinjauan yang diperoleh dari hasil penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengenai topik tertentu. Pencarian literatur dilakukan dengan pencarian data sekunder yang diperoleh dari data hasil penelitian oleh para peneliti terdahulu.

Pencarian literatur dilakukan dengan proses mendalam melalui pencarian informasi terpublikasi mengenai suatu topik yang dilakukan menggunakan berbagai alat pencarian informasi. Kriteria jurnal yang

dipilih yaitu jurnal yang berkaitan dengan rekayasa mikrobioma rizosfer pada tanaman pangan dalam mendukung pertanian berkelanjutan dengan rentang waktu publikasi pada tahun 2019-2024. Sumber data didapat dari publikasi *Google Scholar* dan *ScienceDirect*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berdasarkan data dari berbagai penelitian yang telah dilakukan dan penjelasan datanya tertera dalam Tabel 1.

Tabel 1. Rekayasa mikrobioma rizosfer dan pengaruhnya pada tanaman pangan

Perlakuan	Tanaman Pangan	Pengaruh Rekayasa pada Tanaman	Referensi
Rekayasa ketahanan komunitas rizobakteri dengan <i>mannose nanofibril hydrogel</i> di bawah cekaman kekeringan	Gandum	Peningkatan komunitas mikroba rizosfer. Peningkatan dinamika dan selektivitas masuknya sera kolonisasi bakteri menguntungkan bagi tanaman pada skala mikroskos tanah. Peningkatan hasil panen jagung sebesar 20% di bawah cekaman kekeringan dibandingkan dengan kontrol.	[9]
Pemberian pupuk kimia yang ditambahkan bakteri <i>Acidovorax valerianellae</i> and <i>Sinorhizobium fredii</i>	Kacang polong (<i>Cajanus cajan</i> L.)	Perlakuan dapat mengurangi setengah dari dosis pupuk kimia. Peningkatan hasil panen kacang polong sebesar 49-40% dibandingkan kontrol. Peningkatan populasi bakteri pada semua perlakuan <i>after successive intervals</i> ..	[10]
Rekayasa rizosfer tanaman dengan pemberian PGPR	Jagung (<i>Zea mays</i> L.)	Pemberian berbagai isolat rhizobacteria dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan akar jika dibandingkan dengan perlakuan kontrol.	[11]
Pemberian amandemen biochar pada lahan sawah	Padi	Pemberian biochar pada lahan sawah dapat meningkatkan karbon organik tanah, agregasi tanah, kesehatan tanah, dan peningkatan populasi mikroba dibandingkan dengan kontrol.	[12]
Penanaman berbagai jenis tanaman penutup tanah	Kentang	Perlakuan penanaman berbagai jenis tanaman penutup tanah memberikan pengaruh signifikan pada hasil umbi kentang dan mempengaruhi perubahan mikroba secara signifikan.	[13]

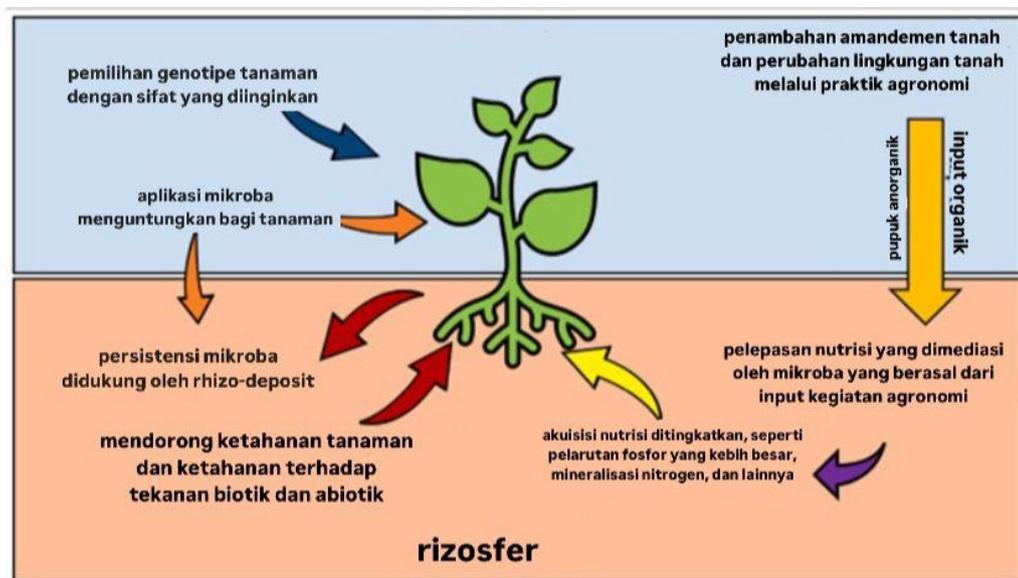
1. Mikrobioma Rizosfer pada Praktik Pertanian

Kemampuan berbagai mikroba rizosfer menguntungkan yang dapat berperan sebagai biostimulan, biofertilizer, dan biokontrol berpotensi dalam meningkatkan produktivitas tanaman^[14]. Hal tersebut menyebabkan mikrobioma rizosfer dapat berpotensi menjadi solusi dalam mengatasi

masalah pertanian yang berkaitan dengan ketahanan pangan, hasil panen yang lebih tinggi, dan degradasi lahan^[15]. Rekayasa mikrobioma rizosfer perlu dilakukan untuk mendorong pertumbuhan mikroba rizosfer yang menguntungkan sehingga menghasilkan interaksi positif bagi tanaman. Rekayasa mikrobioma rizosfer dapat dilakukan pada praktik agronomi, yaitu dengan seleksi genotipe atau pemilihan tanaman dengan sifat

yang diinginkan serta gen yang memungkinkan untuk menarik dan memanfaatkan mikroba menguntungkan, pengaplikasian mikroba menguntungkan, seperti *Plant Growth Promoting Microorganisms* (PGPM), penambahan bahan organik sebagai nutrisi bagi mikroba sehingga mendorong pertumbuhan mikroba menguntungkan semakin melimpah di dalam tanah^[16]. Praktik agronomi lain, seperti pemberian pupuk, pemberian amelioran sebagai pembenah tanah, pengolahan tanah,

irigasi, dan penanaman tanaman penutup tanah dapat memberikan pengaruh berupa perubahan pada rizosfer. Hal tersebutlah yang mempengaruhi interaksi mikroba dengan tanaman dan tanah. Jenis tanaman yang tumbuh secara baik dan sehat dapat dipilih untuk dikembangbiakkan dan rhizodepositnya dapat menjadi habitat bagi spesies mikroba rizosfer yang menguntungkan bagi pertumbuhan dan kesehatan tanaman serta tanah sehingga dapat mendukung pertanian berkelanjutan^[17].



Gambar 1. Rekayasa rizosfer pada praktik agronomi

Sumber : Mahmud dkk., 2021(diterjemahkan ke dalam Bahasa Indonesia)

2. Metode memperoleh mikroba rizosfer menguntungkan dari tanaman

Mikroba yang memiliki potensi untuk bermanfaat atau efektif bagi tanaman yang dapat direkayasa untuk pertanian hanya sedikit jumlahnya, yaitu dibawah 5%^[18]. Setiap jenis tanaman memiliki komposisi mikrobanya tersendiri, misalnya pada tanaman jagung dan padi memiliki komposisi mikroba inti yang khas. Mikroba rizosfer ini diperoleh dengan cara tanaman membawa sejumlah besar populasi mikroba yang diwariskan dari tanaman induknya dan tanaman melepaskan sinyal yang ditargetkan dan melepaskan eksudat akar yang dapat

menjadi potensi untuk mengundang mikroba menguntungkan mendiami area rizosfer tanaman tersebut^[19].

3. Rekayasa Mikrobioma Rizosfer untuk Pertanian

3.1 Budidaya tanaman berbasis pertanian organik

Menurut penelitian Lupatini et al.,^[20] pada pertanaman jagung, sistem pertanaman organik meningkatkan keragaman mikroorganisme dibandingkan dengan pertanaman konvensional. Hal ini disebabkan oleh banyaknya bahan organik yang

dimasukkan pada pertanian organik, tidak adanya input bahan kimiawi, dan adanya berbagai spesies tanaman lain yang tumbuh di sekitar tanaman utama baik rumput maupun refugia, yang merupakan tanaman hias dengan warna bunga yang mencolok. Penelitian menunjukkan bahwa keragaman mikroorganisme yang lebih tinggi pada pertanian organik disebabkan oleh banyaknya bahan organik yang dimasukkan, tidak adanya input bahan kimiawi, dan adanya berbagai spesies tanaman lain yang tumbuh di sekitar tanaman utama baik rumput maupun refugia^[20].

Menurut penelitian Liao ^[21], perlakuan pertanian organik dalam jangka panjang meningkatkan jumlah nutrisi seperti nitrogen tersedia, fosfor tersedia, dan total zink dalam tanah serta jumlah dan keragaman mikroorganisme tanah. Sementara itu, pada pertanian konvensional, efek jangka panjang dari penggunaan pestisida, fungisida, dan herbisida menyebabkan jenis mikroorganisme di tanah menjadi lebih homogen. Agrokimia tersebut mengurangi keragaman mikroorganisme karena potensi dari agrokimia untuk mencegah pertumbuhan maupun mematikan berbagai jenis mikroorganisme^[21].

3.2 Pemberian biofertilizer pada tanah

Mikroba rizosfer menyediakan unsur hara makro dan mikro agar dapat diserap oleh tanaman sehingga dapat meningkatkan kesehatan tanah dan juga tanaman. Pupuk hayati ini dapat mengandung berbagai mikroba menguntungkan, seperti bakteri pelarut fosfat, bakteri pemfiksasi nitrogen, dan lainnya. Pupuk hayati yang mengandung berbagai mikroba menguntungkan dapat mempengaruhi komunitas mikroba yang ada pada mikrobioma rizosfer. Pada tanaman kedelai yang diberikan pupuk triple superfosfat dan diinokulasikan dengan pupuk hayati *Trichoderma* spp. memberikan pengaruh positif pada peningkatan serapan P meningkatkan biomassa. Hal ini karena

kombinasi pupuk P dengan *Trichoderma* spp. dapat mendorong pertumbuhan akar pada tanaman kedelai sehingga luas permukaan serapan P meningkat serta meningkatkan populasi *Rhizopus arrhizus* yang dapat mengaktifkan jalur permintaan zat besi efisien yang bermanfaat bagi tanaman^[22].

Rekayasa rizosfer tanaman dengan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang bermanfaat menawarkan peluang besar bagi produktivitas tanaman pangan dalam mendukung pertanian berkelanjutan karena dapat mengurangi input pupuk anorganik pada tanah. Pemberian berbagai isolat rhizobacteria dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dan akar tanaman jagung jika dibandingkan dengan perlakuan kontrol karena kemampuan rhizobacteria dalam mengikat unsur nitrogen yang dibutuhkan oleh tanaman jagung dan juga menghasilkan *indole acetic acid* (IAA). Hal tersebut menunjukkan potensi dari isolat rhizobacteria untuk dijadikan pupuk hayati sehingga dapat mengurangi penggunaan pupuk anorganik pada tanaman^[11].

3.3 Penambahan biochar pada tanaman

Penambahan biochar dengan konsorsium mikroba eksogen yang menguntungkan dapat membantu dalam mengatasi degradasi lahan dengan remediasi, revegetasi serta restorasi tanah yang terkena kontaminasi^[23]. Penambahan biochar dapat meningkatkan kesehatan tanah dengan meningkatkan kualitas tanah secara fisik, kimia, maupun biologi. Penambahan biochar ini dapat juga mempengaruhi populasi mikroba menguntungkan karena kandungan C-organik pada biochar yang dapat menjadi sumber nutrisi bagi mikroba. Kombinasi dari biochar dengan konsorsium mikroba juga dapat membantu mengurangi pencucian pupuk dan menjaga kelembapan tanah sehingga dapat mendukung pertumbuhan tanaman pangan seperti pada penambahan biochar dan *Bacillus* sp. yang dapat

meningkatkan pertumbuhan tanaman pada tunas dan akar^[24].

3.4 Penanaman tanaman penutup tanah

Komunitas mikrobioma rizosfer dapat dipengaruhi oleh spesies tanaman penutup tanah. Penggunaan ruzigrass dan rumput palisade sebagai tanaman penutup tanah dapat meningkatkan komunitas mikrobioma yang menguntungkan setelah musim tanam dalam sistem rotasi tanaman penutup tanah-jagung tanpa pengolahan tanah. Hal ini dikarenakan tanaman penutup tanah dapat meningkatkan agregasi tanah, kesuburan, dan siklus hara. Rumput palisade sebagai tanaman penutup tanah dapat meningkatkan kelimpahan *Trichoderma*, yaitu mikroba yang memperbaiki struktur tanah di sekitar perakaran dan berperan sebagai agensia hayati untuk menekan patogen jagung, seperti *Fusarium* spp. Rumput palisade sebagai tanaman penutup tanah juga dapat meningkatkan populasi mikroba Ascomycota, yaitu mikroba pengurai bahan organik yang dapat meningkatkan kesuburan tanah. Mikroba tanah yang menguntungkan ini mendukung peningkatan produktivitas jagung sehingga dapat mengurangi penggunaan pupuk anorganik dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan^[25].

4. Tantangan dan peluang mikrobioma rizosfer untuk pertanian berkelanjutan

Mikrobioma rizosfer adalah seluruh mikroorganisme, materi genetik, dan aktivitasnya pada suatu komunitas tanah di sekitar akar tanaman. Mikrobioma rizosfer memiliki peran penting dalam pemeliharaan nutrisi tanah dan kesuburan tanaman yang tumbuh di atasnya. Memanfaatkan interaksi antara komunitas mikroba tanah dan tanaman merupakan pendekatan yang relevan untuk meningkatkan produksi pangan bagi populasi manusia di dunia yang terus bertambah dengan biaya lingkungan yang paling rendah^[26].

Beberapa tantangan mikrobioma rizosfer untuk pertanian berkelanjutan, yaitu penggunaan pupuk anorganik yang berlebihan dapat merusak mikrobioma rizosfer dan mengurangi kesuburan tanah, dan penggunaan pestisida yang berlebihan dapat membunuh mikroorganisme yang bermanfaat bagi tanaman. Beberapa peluang mikrobioma rizosfer untuk pertanian berkelanjutan, yaitu mikroba rizosfer dapat memfiksasi nitrogen dan memproduksi fitohormon yang penting bagi pertumbuhan tanaman, penggunaan biofertilizer yang mengandung bakteri penambat nitrogen dapat mendukung tercapainya pertanian berkelanjutan, dan asosiasi mikroorganisme rizosfer dengan tanaman dapat meningkatkan penyerapan fosfat dan nutrisi lainnya^[27].

Dalam pertanian berkelanjutan, peran mikrobioma rizosfer sangat penting untuk menjaga kesuburan tanah dan meningkatkan produktivitas tanaman. Oleh karena itu, penggunaan pupuk dan pestisida harus diatur dengan bijak agar tidak merusak mikrobioma rizosfer dan nutrisi tanah tetap terjaga. Selain itu, penggunaan biofertilizer dan teknik molekuler dapat menjadi peluang untuk meningkatkan kualitas mikrobioma rizosfer dan produktivitas tanaman pangan.

KESIMPULAN

Rekayasa mikrobioma rizosfer untuk meningkatkan populasi mikroba menguntungkan yang dapat berperan sebagai biofertilizer, biostimulan, dan biokontrol sehingga dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia dan juga pestisida. Pengurangan input kimia ke dalam tanah dan tanaman dapat mendukung pertanian ramah lingkungan. Mikroba rizosfer menguntungkan juga dapat mendukung pertumbuhan dan hasil dari tanaman pangan. Rekayasa mikrobioma rizosfer untuk meningkatkan populasi mikroba menguntungkan efektif untuk meningkatkan produktivitas tanaman pangan

dan kesehatan tanah serta berperan dalam mendukung pertanian berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Bandyopadhyay, S.K. Bhuyan, P.K. Yadava, A. Varma, and N. Tuteja, "Emergence of plant and rhizospheric microbiota as stable interactomes", *Protosplasma*, vol. 254, no. 2), pp 617–626, 2017.
<https://doi.org/10.1007/s00709-016-1003-x>.
- [2] C.H. Haney, and F.M. Ausubel, "Plant microbiome blueprints". *Science*, vol 349, pp. 788–789, 2015.
- [3] G. Berg, D. Rybakova, M. Grube, and M. Köberl, "The plant microbiome explored: implications for experimental botany". *J. Exp. Bot.* Vol. 67, pp. 995–1002, 2016.
- [4] B.D. Martin, and E. Schwab, "Current usage of symbiosis and associated terminology". *International Journal of Biologi* vol. 5, no. 1, pp. 32-45, 2013, <https://doi.org/10.5539/ijb.v5n1p32>.
- [5] M.I. Mhlongo, L.A.Piater, N.E. Madala, N. Labuschagne, and, Dubery, 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", *Front. Plant Sci*, vol. 9, no. 12, 2018.
- [6] C.H. Haney, B.S. Samuel, J. Bush, and F.M. Ausubel, "Associations with rhizosphere bacteria can confer an adaptive advantage to plants", *Nat. Plants* 1(15051), 2015.
- [7] A. Jousset, and S.W. Lee, "Coming of age for the rhizosphere microbiome transplantation". *Soil Ecology Letters*, vol. 5, no.1, pp. 4–5, 2022.
<https://doi.org/10.1007/s42832-022-0151-5>.
- [8] M.N. Adlini, A.H. Dinda, S. Yulinda, O. Chotimah, and S.J.Merliyana, "Metode penelitian kualitatif studi pustaka. Edumaspul: *Jurnal Pendidikan*, vol. 6, no. 1, pp. 974-980, 2022.
- [9] F. Mathes, P. Murugaraj, J. Bougoure, V.T. Pham, V. K. Truong, M. Seufert, and D.V. Murphy, "Engineering rhizobacterial community resilience with mannose nanofibril hydrogels towards maintaining grain production under drying climate stress". *Soil Biology and Biochemistry*, vol. 142, 107715, 2020.
- [10] R. Arya, C. Pandey, S. Dheeman, A.Aeron, R.C. Dubey, D.K.Maheswhari, L. Chen, and P. Ahmad, "Fertilizers adaptive bacteria *Acidovorax valerianellae* and *Sinorhizobium fredii* in integrated nutrient management of pigeon pea (*Cajanus cajan* L.)". *South African Journal of Botany*. Vol. 134, pp. 84-90, 2020.
- [11] S.H. Youseif, S.H., "Genetic diversity of plant growth promoting rhizobacteria and their effects on the growth of maize plants under greenhouse conditions", *Annals of Agricultural Sciences*, vol. 63, pp. 25–35, 2019.
- [12] H. Lu, R.Bian, X. Xia, K. Cheng, Y. Liu, P. Wang, Z. Li, J. Zheng, X. Zhang, L. Li, S. Joseph, M. Drosos, and G. Pan, "Legacy of soil health improvement with carbon increase following one time amendment of biochar in a paddy soil – A rice farm trial". *Geoderma*, vol. 376 (114567), 2020.
- [13] S.R. Cazzaniga, S. Elsen, C. Lombaers, M. Kroonen, J. Visser, J. Postma, M. Mommer, and J. Helder, "On the legacy of cover crop-specific microbial footprints", *Soil Biology and Biochemistry*. Vol.184 (109080), 2023.
- [14] Q. Saeed, W. Xiukang, F.U. Haider, J. Kučerik, M.Z. Mumtaz, J. Holatko, and A. Mustafa, "Rhizosphere bacteria in plant growth promotion, biocontrol, and bioremediation of contaminated sites: a

- comprehensive review of effects and mechanisms”. *International Journal of Molecular Sciences*, vo. 22, no. 19, 10529, 2021.
- [15] I. Park, Y.S. Seo, and M.Mannaa, M. “Recruitment of the rhizo-microbiome army: assembly determinants and engineering of the rhizosphere microbiome as a key to unlocking plant potential”. *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, 1163832, 2023.
- [16] K. Mahmud, A. Missaoui, K. Lee, B. Ghimire, H.W. Presley, and S. Makaju, S, “Rhizosphere microbiome manipulation for sustainable crop production. *Current Plant Biology*. Vol. 27 (100210), 2021.
- [17] Y.S. Fatma, D. Lesmana, L. Handayani, E. Sulistyorini, B. Arrasyid, M. Soimin, and A.B. Marda, “Mikrobiologi Lingkungan. *Tohar Media*, 2023.
- [18] B. Borer, and R. Tecon, “Spatial organization of bacterial populations in response to oxygen and carbon counter-gradients in pore networks”, *Nat. Commun*, vol. 9, pp. 1–11, 2018.
- [19] X. Shi, Y. Zhao, M. Xu, L. Ma, J.M. Adams, and Y. Shi, “*Insight into Plant-Microbe Interactions in rhizosphere for Sustainable Agriculture in the New Crops Era*”. New Crops, 2023
- [20] M. Lupatini, G. Korthals, M. de Hollander, T.K.S. Jassens and E.E. Kuramae, “Soil microbiome is more heterogeneous in organic than in conventional farming system”. *Frontiers in Microbiology*. Vol.7, pp. 1-13, 2017.
- [21] J. Liao, Y. Liang andan D. Huang, “Organic farming improves soil microbial abundance and diversity under greenhouse condition: A case study in Shanghai (Eastern China)”. *Sustainability*. Vol. 10, pp.1-16, 2018.
- [22] L. Bononi, J.B. Chiaramonte, C.C. Pansa, M.A. Moitinho, and I.S. Melo, “Phosphorus-solubilizing *Trichoderma* spp. from Amazon soils improve soybean plant growth”, *Sci. Rep.* Vol. 10, pp. 1–13, 2020.
- [23] Z.F. Liu, H.G. Ge, C. Li, Z.P. Zhao, F.M. Song, and S.B. Hu, “Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil by plant co-cropping associated with PGPR, *Water Air Soil Pollut.* Vol 226 (29), 2015.
- [24] T. Namgay, B. Singh, and B.P. Singh, “Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (I L.)”, *Soil Res.* Vol. 48, pp. 638–647, 2010
- [25] L. Momesso, C.A.C. Crusciol, J.W. Bossolani, L.G. Moretti, M. F.A. Leite, G.A. Kowalchuk, and E.E. Kuramae, “Toward more sustainable tropical agriculture with cover crops: Soil microbiome responses to nitrogen management”. *Soil and Tillage Research*, 224, 105507., 2022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105507>
- [26] J.M. Barea, “Future challenges and perspectives for applying microbial biotechnology in sustainable agriculture based on a better understanding of plant-microbiome interactions”. *Journal of soil science and plant nutrition*, vol. 15, no. 2, pp. 261-282, 2015.
- [27] N.O. Igiehon, and O.O. Babalola, “Rhizosphere microbiome modulators: contributions of nitrogen fixing bacteria towards sustainable agriculture”. *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, no. 4, pp. 574, 2019.