

Aplikasi Inokulasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* dengan Sistem Tumpangsari Menuju Peningkatan Efisiensi Air dan Hara yang terbatas di Lahan Kering di Nusa Tenggara Barat

Putri Yunita Wahyuti^{1*}, Suwardji², Lolita Endang Susilowati³, Mulyati⁴

¹⁻⁴ Program Studi Magister Pengelolaan Sumberdaya Lahan Kering, Universitas Mataram, Indonesia

Email : putriyunitawahyuti@gmail.com

*Penulis Korespondensi: putriyunitawahyuti@gmail.com

Abstract. *This research was conducted to systematically examine scientific evidence regarding the mechanisms and synergistic impacts of PGPR and intercropping on Water Use Efficiency (WUE) and Nutrient Use Efficiency (NUE) in drylands. The method used was a systematic literature study with a search for peer-reviewed articles and strict selection of research evaluating WUE and NUE parameters in intercropped crops and crops inoculated with PGPR. The results showed that intercropping systems can increase soil water retention, improve microclimate conditions, and optimize the utilization of space and nutrients between plant species. PGPR contributes to improving plant growth through nitrogen fixation mechanisms, phosphate dissolution, phytohormone production, and strengthening tolerance to drought stress. The synergy between these two approaches enhances the plant's ability to utilize water and nutrients more efficiently, thereby implying an increase in productivity and sustainability of dryland agricultural systems. These findings emphasize the need for verification through field trials, development of adaptive local PGPR isolates, and institutional and policy support to expand the application of this technology to drylands.*

Keywords: Dry Land, Intercropping, Nutrient Efficiency (NUE), PGPR, Water Efficiency (WUE).

Abstrak Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji secara sistematis bukti ilmiah mengenai mekanisme dan dampak sinergis PGPR dan tumpangsari terhadap Efisiensi Penggunaan Air (*Water Use Efficiency/WUE*) dan Efisiensi Penggunaan Hara (*Nutrient Use Efficiency/NUE*) di lahan kering. Metode yang digunakan berupa studi literatur sistematis dengan penelusuran artikel *peer-reviewed* dan seleksi ketat terhadap penelitian yang mengevaluasi parameter WUE dan NUE pada tanaman tumpangsari maupun tanaman yang diinokulasi PGPR. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem tumpangsari dapat meningkatkan retensi air tanah, memperbaiki kondisi mikroklimat, dan mengoptimalkan pemanfaatan ruang dan nutrisi antar spesies tanaman. PGPR berkontribusi terhadap peningkatan pertumbuhan tanaman melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi fitohormon, dan penguatan toleransi terhadap cekaman kekeringan. Sinergi antara kedua pendekatan tersebut meningkatkan kapasitas tanaman dalam memanfaatkan air dan hara secara lebih efisien, sehingga berimplikasi pada peningkatan produktivitas dan keberlanjutan sistem pertanian lahan kering. Temuan ini menegaskan perlunya verifikasi melalui percobaan lapangan, pengembangan isolat PGPR lokal yang adaptif dan dukungan kelembagaan dan kebijakan untuk memperluas penerapan teknologi ini pada lahan kering.

Kata Kunci: Efisiensi Air (WUE), Efisiensi Hara (NUE), Lahan Kering, PGPR, Tumpangsari.

1. LATAR BELAKANG

Provinsi Nusa Tenggara Barat merupakan salah satu wilayah di Indonesia yang didominasi oleh iklim kering sebesar 91,2% dengan 89,2% dari keseluruhan wilayah NTB merupakan lahan kering (Hikmat et al., 2023). Lahan kering merupakan lahan sub optimal tidak jenuh air dengan kelembaban tanah dibawah kapasitas lapang sepanjang tahun (Septiadi & Yusuf, 2023) sehingga sistem pengairannya hanya mengandalkan air hujan (Sulfaida Pratami et al., 2025). Lahan kering memiliki potensi besar bagi usaha pertanian pada tanaman pangan, hortikultura (sayuran dan buah-buaha) serta tanaman tahunan. Kendala pemanfaatan pada

lahan kering adalah kondisi fisik lahan dengan kedalaman yang relatif dangkal, lereng yang curam serta kekeringan (Helviani et al., 2021). Tantangan yang dihadapi pertanian lahan kering, ketahanan pangan global, dan pengelolaan sumber daya alam yang berkelanjutan sangat beragam dan saling terkait (Venkateswarlu et al., 2012). Faktor-faktor utama yang menghambat kesuburan tanah semi-kering dan pertanian berkelanjutan adalah curah hujan rendah, modal hara rendah, stres kelembaban, erosi tanah, fiksasi P tinggi, alkalinitas tinggi, dan keanekaragaman hayati tanah rendah. Produktivitas tanaman lahan kering hanya dapat ditingkatkan jika permasalahannya dipahami dengan baik dan efektif (Venkateswarlu et al., 2012).

Salah satu strategi peningkatan produktivitas tanaman pada lahan kering adalah aplikasi inokulasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) dengan sistem Tumpangsari menuju peningkatan efisiensi air dan hara yang terbatas di lahan kering. Inovasi teknologi pertanian salah satunya adalah pemanfaatan bakteri non patogenik dari perakaran tanaman (rizobakteri) yang tergolong ke dalam kelompok *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR). *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) ialah sekelompok mikroba tanah yang berada di sekitar daerah perakaran tanaman yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat dalam pemacu pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Rahmat et al., 2021). Inovasi ini dianggap mampu mengurangi penggunaan pupuk anorganik dan meningkatkan produktivitas dimana beberapa jenis *rhizobacteria* pada PGPR berfungsi untuk memacu pertumbuhan tanaman atau sebagai agensia pengendali hayati terhadap penyakit tanaman yang disebabkan patogen tanah dan dapat meminimalisir kerusakan ekosistem (Komansilan et al., 2023).

Sistem tumpangsari merupakan merupakan strategi tanam dengan lebih dari satu tanaman yang berada di lahan yang sama untuk dapat bersama memanfaatkan nutrisi tanah (Yang et al., 2018), kelembapan tanah, fluks gas rumah kaca dan sinar matahari (Raza et al., 2019) dalam (Maitra, 2020). Sistem ini digunakan pada pertanian dengan tujuan memaksimalkan pertumbuhan tanaman-tanaman yang dikombinasikan dengan karakter dan profil yang berbeda. Kemampuan tumpangsari memperbaiki kondisi fisik tanah melalui peningkatan tutupan lahan dan kelembapan dianggap sesuai dengan kemampuan PGPR dalam memperbaiki kondisi biologis tanah melalui peningkatan aktivitas mikroba dan penyerapan nutrisi. Interaksi keduanya menciptakan potensi sinergi yang besar, namun bukti-bukti ilmiah mengenai dampak interaksi ini terhadap Efisiensi Air (WUE) dan Efisiensi Hara (NUE) di lahan kering masih terfragmentasi. Kesenjangan analisis ini menghambat perumusan model pengelolaan yang terukur. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menganalisis secara kritis mekanisme dan dampak sinergi Aplikasi Inokulasi PGPR dengan Sistem Tumpangsari

terhadap peningkatan Efisiensi Air dan Hara di Lahan Kering, sebagai landasan pengembangan strategi pertanian berkelanjutan di wilayah NTB dan lahan kering sejenis.

2. KAJIAN TEORITIS

Lahan kering merupakan bioma terbesar di bumi (Wang et al., 2018) yang didefinisikan sebagai lahan sub optimal yang pengairannya hanya mengandalkan curah hujan yang turun di tanah tersebut (Sulfaida Pratami et al., 2025). Lahan kering memiliki potensi produksi tanaman yang lebih rendah dari lahan subur (Septiadi & Yusuf, 2023). Penelitian (Cortina et al., 2013) menyebutkan bahwa Laporan *Millenium Ecosystem* menyatakan lahan kering mencakup 41% permukaan bumi dengan 36% populasi yang heterogen. Ritung dkk. (2015) dalam penelitian (Siti Rohmaniati et al., 2024) menjelaskan bahwa Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) memiliki luas wilayah lahan kering yang mendominasi sebesar 85,19% dari total luas lahan. Kendala budidaya lahan kering adalah rendahnya produktivitas tanaman (Sulfaida Pratami et al., 2025) yang disebabkan kekurangan air, musim kemarau yang panjang, dan kondisi kesehatan tanah yang tidak mendukung (Septiadi & Yusuf, 2023) (Sulfaida Pratami et al., 2025).

Peningkatan kesehatan tanah dapat dilaksanakan dengan inovasi penggunaan bahan organik (Sulfaida Pratami et al., 2025), dengan pendekatan penggunaan bakteri PGPR sebagai pemacu pertumbuhan tanaman secara signifikan (Harefa & Kristiani, 2024) dan pengendali penyakit (Komansilan et al., 2023) dengan mekanisme produksi hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin, pelarutan fosfat, dan peningkatan penyerapan (Siti Rohmaniati et al., 2024) sehingga dapat mengurangi stres abiotik (Munir et al., 2022). *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) merupakan kumpulan mikroba tanah yang berada disekitar akar tanaman (Rahmat et al., 2021). Mikroba ini akan bertindak sebagai biofertilizer dan biostimulan yang sangat bermanfaat bagi keberlanjutan produksi pertanian pada kondisi stres air pada tanah (Gowtham et al., 2022).

Penerapan inovasi teknologi pertanian yang dipadukan dengan pendekatan PGPR adalah sistem tumpangsari yang mengkombinasikan beberapa variasi penanaman tanaman pertanian dalam satu lahan tanam (Yang et al., 2018) (Maitra, 2020). Kelebihan sistem ini adalah pemanfaatan bersama antar tanaman terhadap sinar matahari, unsur hara dan air (Komansilan et al., 2023), pengurangan populasi abiotik berbahaya, konservasi sumber daya dan kesehatan tanah yang mendukung keberlanjutan pertanian (Maitra, 2020). Keberhasilan sistem tumpangsari dipengaruhi oleh pemilihan kombinasi tanaman, tata letak dan jarak penanaman,

sinkronisasi tanam dan panen tanaman, pemupukan dan pengairan serta pengendalian penyakit dan gangguan hama (Nasution, 2025).

3. METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penulisan artikel ini adalah Studi Literatur Sistematis dan Kritis. Pendekatan ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara mendalam bukti-bukti ilmiah mengenai sinergi antara aplikasi PGPR dan sistem Tumpangsari terhadap Efisiensi Air dan Hara di lahan kering. Pengumpulan data dilakukan secara sistematis dari basis data ilmiah bereputasi seperti Scopus, Web of Science, dan ScienceDirect. Pencarian menggunakan kombinasi kata kunci spesifik (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR), *Intercropping* dan *Dryland*) yang dibatasi pada literatur primer sepuluh hingga lima belas tahun terakhir. Artikel yang ditemukan disaring melalui dua tahap: (1) evaluasi judul dan abstrak, dan (2) validasi teks penuh untuk memastikan penelitian tersebut secara eksplisit mengukur dampak terintegrasi kedua variabel terhadap Efisiensi Air (*Water Use Efficiency* (WUE)) dan Efisiensi Hara (*Nutrient Use Efficiency* (NUE)).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Ketahanan Tanaman di Lahan Kering (*Dryland*)

Studi terkait peningkatan efisiensi air dan hara lahan kering (*dryland*) telah sering dilakukan antara lain oleh (Davies et al., 2011) yang meneliti terkait dengan keilmuan baru terkait penggunaan sumberdaya lahan terbatas air untuk meningkatkan hasil panen, dalam penelitian yang sama dijelaskan bahwa sistem tumpangsari dimanfaatkan untuk meningkatkan produktivitas per satuan lahan. Penelitian (Waraich et al., 2011) juga menjelaskan bahwa keterbatasan air pada lahan kering membutuhkan pendekatan efisien dengan perbaikan genetik dan regulasi fisiologis sehingga stress air yang mengakibatkan terhambatnya fotosintesis tanaman. Penelitian lainnya, (Sainju et al., 2012) juga menekankan pentingnya praktik pengelolaan tanah untuk dapat meningkatkan Nitrogen (N) dengan pengaruh pengolahan tanah, rotasi tanaman dan praktek budidaya pada lahan kering. Penelitian lainnya membahas peningkatan penggunaan lahan kering penting dilaksanakan sesuai dengan pembahasan Boko et. al. (2007) dalam (Cowie et al., 2011) yang menjelaskan keterhubungan efek umpan balik degradasi lahan kering dengan hilangnya cadangan karbon pada vegetasi dan tanah, peningkatan karbon dioksida pada atmosfer dan perubahan iklim yang diikuti dengan peningkatan suhu dan penurunan curah hujan contohnya pada Afrika Selatan. Kondisi defisit air pada lahan kering seringkali menentukan produktivitas tanaman, penyebab defisit air dapat

terjadi karena transpirasi dan evapotranspirasi (Zahra et al., 2021) sehingga diperlukan strategi efisiensi terkait penggunaan air. Praktik pengelolaan lahan yang tepat yang melestarikan tanah dan air, dipadukan dengan pengelolaan hara terpadu dan legum dalam rotasi tanaman, akan memulihkan tanah lahan kering (Somasundaram et al., 2014) sehingga kadar air tanah yang baik akan membantu mineralisasi N dan penyerapan nutrisi tanaman (Nawaz & Farooq, 2016).

Tantangan saat ini adalah memaksimalkan infiltrasi air, memitigasi musim kemarau, dan terutama meningkatkan kesuburan tanah untuk meningkatkan produktivitas (Moswetsi et al., 2017.) . Penelitian (Mao et al., 2025) mendukung tantangan tersebut dengan menjelaskan bahwa kekeringan dan defisiensi hara merupakan faktor utama yang membatasi produksi tanaman di daerah kering, sedangkan pada lahan kering dengan keterbatasan air dan sumber hara, penanaman terus menerus tanpa pengolahan tanah dengan pemupukan akan menghilangkan pasokan nutrisi tanah yang akan mengancam produksi secara jangka panjang (Zahra et al., 2021). Sehingga dibutuhkan strategi untuk mengatasi keterbatasan air dan unsur hara. Penelitian Sigit dan Marsono (2008) dalam (Siti Rohmaniati et al., 2024) menjelaskan bahwa pupuk kandang sebagai salah satu pilihan sumber nutrisi utama yang aman bagi sistem pertanian organik dimana dapat membantu menetralkan pH tanah, mengurangi logam berat beracun, memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air, dan menstabilkan suhu tanah. Pernyataan didukung oleh (Lian et al., 2020) dalam penelitiannya yang menjelaskan bahwa pemupukan yang tidak tepat berdampak negatif terhadap kualitas tanah dan pemanfaatan simpanan air tanah.

Tumpangsari sebagai Strategi Optimalisasi Penggunaan Air dan Hara Spasial

Tumpangsari merupakan salah satu teknik budidaya yang memadukan dua atau lebih jenis tanaman dalam satu lahan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air, cahaya, ruang, dan unsur hara. Penelitian (Nasution, 2025) menjelaskan bahwa pola tanam tumpangsari merupakan salah satu strategi budidaya pertanian yang terbukti dapat meningkatkan efisiensi pemanfaatan lahan dan mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Nicholls dan Altieri (2013) dalam (Maitra, 2020) menjelaskan bahwa keragaman tanaman yang ditanam pada sistem tumpangsari menciptakan keberagaman hasil produk pertanian (Nasution, 2025) dan mendukung ekologi yang menguntungkan bagi predator, sehingga mendukung keberlanjutan ekosistem pertanian (Maitra, 2020). Pada penelitian yang sama juga menjelaskan bahwa keuntungan sistem tumpangsari lainnya adalah penghematan penggunaan sumber daya pertanian, pengurangan agen biotik berbahaya, peningkatan produksi tanaman, konservasi sumberdaya dan kesehatan tanah serta keberlanjutan sistem tumpangsari dengan lokasi yang sama.

Penelitian eksperimen lapangan pernah dilaksanakan terkait sistem tumpang sari antara lain pada penelitian (Fusuo Zhang dan Long Li (2003) dalam (Davies et al., 2011) yang menjelaskan bahwa sistem tumpangsari antara tanaman jagung, kacang tanah, kacang faba dan kacang buncis memberikan hasil positif dengan peningkatan nutrisi zat besi pada kacang tanah oleh jagung, kacang faba meningkatkan penyerapan nitrogen dan fosfor oleh jagung dan buncis membantu penyerapan P oleh gandum terkait dari fitat-P. Selain itu, pengurangan nitrat pada profil tanah terjadi dimana sistem tumpangsari lebih efisien dalam menggunakan nutrisi tanah dibandingkan monokultur. Li dkk. (2007) juga dalam (Davies et al., 2011) menjelaskan bahwa sistem tumpang sari pernah diaplikasikan pada asosiasi tanaman sereal/ kacang-kacangan yang bertujuan untuk meningkatkan hasil sereal melalui fiksasi N biologis oleh kacang-kacangan, atau dengan meningkatkan bioavailabilitas fosfor. Salah satu tanaman yang sering digunakan pada sistem tumpangsari adalah tanaman legum seperti kacang-kacangan, alasannya adalah kemampuan tanaman jenis ini dalam melakukan fiksasi nitrogen melalui bakteri simbiotik seperti *Rhizobium* sehingga dapat menambah cadangan nitrogen di tanah yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman non-legum lainnya pada sistem tumpangsari (Bhattacharyya & Jha, 2012) dan peningkatan aktivitas mikroba tanah termasuk PGPR yang bekerja untuk membawa fosfat dan meningkatkan ketersediaan unsur hara mikro seperti mangan dan sulfur. Hal ini juga didukung oleh penelitian (Mao et al., 2025) yang menyatakan bahwa inokulasi *rhizobium* telah meningkatkan keuntungan hasil dan konsentrasi P-Olsen tanah melalui peningkatan fasilitasi interspesifik kacang faba pada jagung dalam sistem tumpang sari.

Metode Aplikasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR)

Salah satu upaya untuk mengurangi penggunaan pupuk anorganik secara berlebihan yaitu dengan menggunakan *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang bertindak sebagai benteng terhadap stress kekeringan yang dialami tanaman sehingga dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman (Khan et al., 2020). *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) ialah sekelompok mikroba tanah seperti bakteri, fungi, protozoa, dan alga (Khan et al., 2020) yang berada di sekitar daerah perakaran tanaman yang secara langsung maupun tidak langsung terlibat dalam pemacu pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Rahmat et al., 2021). Tanaman melakukan pelepasan senyawa organik melalui eksudat untuk memilih bakteri yang paling berkontribusi terhadap kesehatan tanaman dalam kondisi tertekan sehingga dapat membantu konservasi air, produktivitas tanah, dan kesehatan tanaman (Khan et al., 2020). Glick (1995) menjelaskan dalam (Khan et al., 2020) menjelaskan bahwa implementasi PGPR melalui berbagai mekanisme biologis dapat mengubah kadar fitohormonal, menyesuaikan metabolisme, memproduksi eksopolisakarida bakteri, membentuk

biofilm, dan resistensi antioksidan, termasuk akumulasi berbagai zat terlarut organik yang sesuai seperti karbohidrat, asam amino, dan poliamina serta produksi hormon pertumbuhan seperti auksin dan sitokinin, pelarutan fosfat, dan peningkatan penyerapan hara (Siti Rohmaniati et al., 2024).

Pernyataan ini didukung oleh (Munir et al., 2022) dalam penelitian (Al-Turki et al., 2023) yang juga menjelaskan kemampuan PGPR secara eksogen mengubah komunitas rizosfer tanaman dalam tanah. Selain itu, PGPR dapat mempengaruhi metabolisme dan ekspresi gen tanaman secara langsung, serta ekspresi protein akar, morfologi akar, dan pertumbuhan akar (Waraich et al., 2011). Kemampuan PGPR lainnya yaitu membantu tanaman untuk memodulasi kapasitas inang dalam penyerapan hara dan interaksi patogen dan mengubah kemampuan tanaman untuk menoleransi stresor biotik dan abiotik (Al-Turki et al., 2023).

Penelitian yang telah melaksanakan penerapan PGPR antara lain uji lapangan oleh (Lian et al., 2020) pada tanaman padi yang ditanam di lahan marjinal dengan kadar garam tinggi dengan hasil penelitian menunjukkan terjadi peningkatan hasil panen sebesar 15% dibandingkan dengan tanaman kontrol tanpa perlakuan. Penelitian lainnya dilakukan oleh Muhyat et al. (2020) menjelaskan dalam penelitiannya bahwa PGPR berperan penting dalam peningkatan ketersediaan dan pengambilan unsur hara di tanah bagi tanaman, sehingga jumlah gabah bernas per malai juga meningkat (Komansilan et al., 2023). Penelitian tahun oleh (Ollo et al., 2019) pada tanaman cabai merah menemukan bahwa penggunaan PGPR dapat meningkatkan semua variabilitas vegetatif tanaman, termasuk tinggi tanaman, jumlah daun, volume akar, berat basah, dan berat kering. PGPR memiliki kemampuan untuk menghasilkan fitohormon yang merangsang pertumbuhan tanaman, seperti auksin, sitokinin, dan gibberelin. Pernyataan tersebut didukung oleh penelitian Singh et al. yang menemukan bahwa bakteri seperti *Azospirillum* dan *Pseudomonas fluorescens* dapat meningkatkan panjang akar, luas daun, dan jumlah anakan pada tanaman padi (Khan et al., 2020).

Dampak Sinergis PGPR Tumpangsari terhadap Efisiensi Air (*Water Use Efficiency* (WUE)) dan Efisiensi Hara (*Nutrient Use Efficiency* (NUE)) Tanaman di Lahan Kering

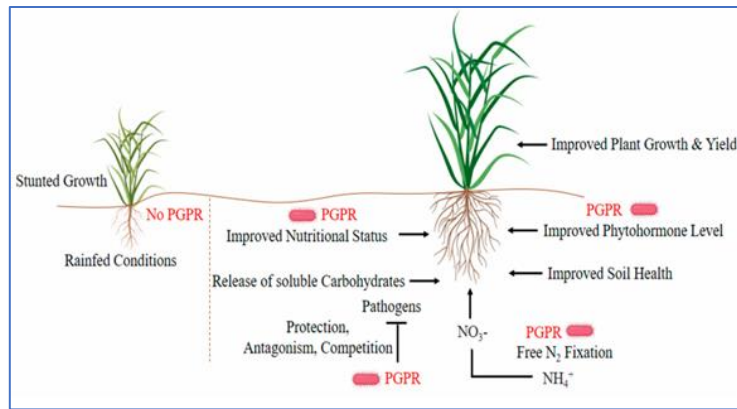
Sinergi antara penerapan PGPR dan sistem tumpangsari pada lahan kering memiliki potensi signifikan dalam meningkatkan hasil tanaman dan produktivitas lahan. Aplikasi sistem tumpangsari terbukti mendukung aktivitas PGPR dalam meningkatkan kesehatan tanaman dan ketahanan tanaman terhadap cekaman abiotik dan kekeringan. Penelitian (Al-Turki et al., 2023) menjelaskan bahwa bakteri penghuni rizosfer, yang biasa disebut PGPR, dapat menginduksi tanaman dalam beberapa cara baik langsung maupun tidak langsung antara lain dalam fiksasi nitrogen, produksi fitohormon, produksi 1-aminosiklopropana-1-karboksilat deaminase

(Maitra, 2020), produksi eksopolisakarida (Ilyas et al., 2020) produksi siderofor (Nithyapriya et al., 2021), produksi antioksidan produksi osmoprotektan (Ilyas et al., 2020) dan penyerapan nutrisi (Jabborova et al., 2022). Pengelolaan mikroorganisme bermanfaat yang terkandung dalam rizosfer dapat digunakan sebagai alternatif pupuk kimia untuk meningkatkan kesuburan tanah dan produksi tanaman dalam agroekosistem berkelanjutan. Penelitian (Khan et al., 2020). juga melaporkan bahwa aplikasi PGPR dalam sistem tumpang sari dapat menyediakan nutrisi dalam jumlah yang cukup sehingga mengurangi persaingan nutrisi.

Penelitian lain juga menjelaskan bahwa tanaman yang diinokulasi menunjukkan toleransi yang tinggi terhadap kondisi kekurangan air dengan menunda dehidrasi dan mempertahankan status air tanaman pada tingkat optimal serta memperkuat sistem pertahanan tanaman terhadap berbagai stres biotik dan abiotik, khususnya stres kekeringan (Khan et al., 2020). Penelitian (Wang et al., 2018) terkait pemanfaatan lahan kering dengan praktik efisiensi penggunaan air WUE menjelaskan bahwa pengolahan WUE meningkatkan penyimpanan air sebesar 8-12% sebagai potensi mitigasi terhadap kekeringan pada lahan kering di Tiongkok Utara.

Pentingnya ketercukupan air dan hara pada tanaman di lahan kering dapat didukung oleh (Lian et al., 2020), yang menjelaskan bahwa defisit air dan perlakuan N yang rendah/ terbatas pada tanaman menyebabkan penurunan signifikan pada hasil gabah varietas lama yang diteliti namun genotipe baru mampu melewati keterbatasan tersebut. Selain dari genotipe gabah sebelum tahun 1980-an, genotipe tahun 2000-an dan 2010-an, maka genotipe lainnya tidak memiliki sensitivitas stres nitrogen dan air yang rendah. Kemampuan rizosfer yang diinokulasikan dalam PGPR sistem tumpangsari dapat dilihat pada Gambar 1 pada penelitian (Khan et al., 2020).

Gambar 1 menjelaskan bahwa pada aplikasi inokulasi PGPR dengan sistem tumpangsari dalam penelitian (Khan et al., 2020). bahwa aplikasi PGPR Rhizosfer dapat meningkatkan produksi tanaman pada level pertumbuhan tanaman, level phytohormone pada akar, status nutrisi pada akar, kesehatan tanah, pelepasan zat karbohidrat terlarut, fiksasi bebas N dan proteksi terhadap patogen. Hal ini dapat mendukung Efektivitas penggunaan Nutrisi (NUE) dari akar dengan tumpangsari dengan rizosfer. Penelitian Husen dkk. (2009) menjelaskan bahwa Rhizobacteria dalam PGPR berfungsi sebagai pemacu pertumbuhan tanaman, sementara Egamberdieva (2009) mencatat bahwa PGPR seperti *Azospirillum* dan *Pseudomonas* dapat merangsang pertumbuhan, mengurangi stres garam, dan meningkatkan penyerapan hara (Siti Rohmaniati et al., 2024).



Gambar 1. Strategi peningkatan pertumbuhan tanaman (PGPR) dalam kondisi stres kekeringan (Khan et al., 2020).

PGPR dapat menjadi solusi strategis untuk meningkatkan ketahanan pangan, mendukung pertanian berkelanjutan, dan meningkatkan produktivitas pertanian di Indonesia dengan pengembangan dan kolaborasi lebih lanjut antara peneliti, petani, dan pembuat kebijakan (Harefa & Kristiani, 2024). Hal ini diperkuat pernyataan oleh (Khan et al., 2020) bahwa inokulasi tanaman dengan mikroorganisme pemacu pertumbuhan dapat meningkatkan strategi retensi air dan toleransi kekeringan tanaman yang tumbuh di daerah kering sehingga menjadi potensi solusi terhadap tantangan stress kekurangan air dan unsur hara di lahan kering secara berkelanjutan. Sesuai dengan pernyataan (Khan et al., 2020), bahwa modulasi status kelembapan oleh PGPR menjadi salah satu mekanisme dalam pertumbuhan tanaman, namun belum banyak penelitian yang dilakukan terkait kelangsungan hidup tanaman pada lahan kering.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Aplikasi inokulasi *Plant Growth Promoting Rhizobacteria* (PGPR) yang dipadukan dengan sistem tumpangsari menunjukkan potensi sinergis dalam meningkatkan efektivitas pengelolaan lahan kering melalui optimalisasi Efisiensi Penggunaan Air (*WUE*) dan Efisiensi Penggunaan Hara (*NUE*). Sistem tumpangsari terbukti mampu memperbaiki kondisi mikroklimat tanah, meningkatkan ketersediaan air, serta menekan kehilangan unsur hara, sedangkan PGPR berperan dalam mendukung pertumbuhan tanaman melalui mekanisme fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, produksi fitohormon, serta penguatan toleransi tanaman terhadap cekaman kekeringan. Sinergi antara kedua pendekatan tersebut memperkuat kemampuan tanaman dalam menyerap air dan hara secara lebih efisien sehingga berdampak pada peningkatan produktivitas lahan kering secara berkelanjutan. Oleh karena itu, perlu penelitian lapangan yang lebih komprehensif untuk memverifikasi efektivitas integrasi PGPR

dan tumpangsari pada berbagai komoditas dan kondisi agroekosistem, pengembangan isolat PGPR lokal yang adaptif terhadap karakteristik lahan kering, peningkatan kapasitas petani melalui program pelatihan teknis, serta penguatan dukungan kebijakan dalam penyediaan inokulan PGPR berkualitas dan integrasi teknologi ini ke dalam program pembangunan pertanian berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Al-Turki, A., Murali, M., Omar, A. F., Rehan, M., & Sayyed, R. Z. (2023). Recent advances in PGPR-mediated resilience toward interactive effects of drought and salt stress in plants. *Frontiers in Microbiology*, 14(September), 1-20. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1214845>
- Bhattacharyya, P. N., & Jha, D. K. (2012). Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), 1327-1350. <https://doi.org/10.1007/s11274-011-0979-9>
- Cortina, J., Vilagrosa, A., & Trubat, R. (2013). The role of nutrients for improving seedling quality in drylands. *New Forests*, 44(5), 719-732. <https://doi.org/10.1007/s11056-013-9379-3>
- Cowie, A. L., Penman, T. D., Gorissen, L., Winslow, M. D., Lehmann, J., Tyrrell, T. D., Twomlow, S., Wilkes, A., Lal, R., Jones, J. W., Paulsch, A., Kellner, K., & Akhtar-Schuster, M. (2011). Towards sustainable land management in the drylands: Scientific connections in monitoring and assessing dryland degradation, climate change and biodiversity. *Land Degradation and Development*, 22(2), 248-260. <https://doi.org/10.1002/ldr.1086>
- Davies, W. J., Zhang, J., Yang, J., & Dodd, I. C. (2011). Novel crop science to improve yield and resource use efficiency in water-limited agriculture. *Journal of Agricultural Science*, 149(S1), 123-131. <https://doi.org/10.1017/S0021859610001115>
- Gowtham, H. G., Singh, S. B., Shilpa, N., Aiyaz, M., Nataraj, K., Udayashankar, A. C., Amruthesh, K. N., Murali, M., Poczai, P., Gafur, A., Almalki, W. H., & Sayyed, R. Z. (2022). Insight into recent progress and perspectives in improvement of antioxidant machinery upon PGPR augmentation in plants under drought stress: A review. *Antioxidants*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/antiox11091763>
- Harefa, O., & Kristiani, L. N. (2024). Peningkatan produktivitas tanaman padi melalui aplikasi bakteri PGPR (Plant Growth Promotion Rhizobacteria). *Jurnal Ilmu Pertanian Dan Perikanan*, 1, 101-106.
- Helviani, H., Juliatmaja, A. W., Bahari, D. I., Masitah, M., & Husnaeni, H. (2021). Pemanfaatan dan optimalisasi lahan kering untuk pengembangan budidaya tanaman palawija di Desa Puday Kecamatan Wongeduku Kabupaten Konawe Provinsi Sulawesi Tenggara. *Mitra Mahajana: Jurnal Pengabdian Masyarakat*, 2(1), 49-55. <https://doi.org/10.37478/mahajana.v2i1.806>

- Hikmat, M., Hati, D. P., Pratamaningsih, M. M., & Sukarman, S. (2023). Kajian lahan kering berproduktivitas tinggi di Nusa Tenggara untuk pengembangan pertanian. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 16(2), 119. <https://doi.org/10.21082/jsdl.v16n2.2022.119-133>
- Ilyas, N., Mumtaz, K., Akhtar, N., Yasmin, H., Sayyed, R. Z., Khan, W., El Enshasy, H. A., Dailin, D. J., Elsayed, E. A., & Ali, Z. (2020). Exopolysaccharides producing bacteria for the amelioration of drought stress in wheat. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su12218876>
- Khan, N., Ali, S., Tariq, H., Latif, S., Yasmin, H., Mehmood, A., & Shahid, M. A. (2020). Water conservation and plant survival strategies of rhizobacteria under drought stress. *Agronomy*, 10(11), 1-23. <https://doi.org/10.3390/agronomy10111683>
- Komansilan, O., Paulus, J. M., Elie, J., & Rogi, X. (2023). Pemberian Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) untuk meningkatkan produksi padi gogo (*Oryza sativa* L) dan jagung (*Zea mays* L) dalam sistem tumpang sari. *Jurnal Mipa*, 11(1), 1-5. <http://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/jmuo>
- Lian, H., Qin, C., He, Z., Niu, J., Zhang, C., Sang, T., Li, H., & Zhang, S. (2020). A synergistic increase in water and nitrogen use efficiencies in winter wheat cultivars released between the 1940s and the 2010s for cultivation in the drylands of the Shaanxi Province in China. *Agricultural Water Management*, 240(June), 106308. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106308>
- Maitra, S. (2020). Intercropping of small millets for agricultural sustainability in drylands: A review. *Crop Research*, 55(3&4), 162-171. <https://doi.org/10.31830/2454-1761.2020.025>
- Mao, J., Wang, P., Xiao, C. L., Wu, J. P., Zhang, W. P., He, J. R., Lambers, H., & Li, L. (2025). Rhizobium inoculation improves yield advantages and soil Olsen phosphorus by enhancing interspecific facilitation in intercropping. *Plant and Soil*, 506(1), 359-373. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06425-5>
- Moswetsi, G., Fanadzo, M., & Ncube, B. (n.d.). Review article cropping systems and agronomic management practices in smallholder farms in South Africa: Constraints, challenges and opportunities. <https://doi.org/10.3923/ja.2017.51.64>
- Munir, N., Hanif, M., Abideen, Z., Sohail, M., El-Keblawy, A., Radicetti, E., Mancinelli, R., & Haider, G. (2022). Mechanisms and strategies of plant microbiome interactions to mitigate abiotic stresses. *Agronomy*, 12(9), 1-33. <https://doi.org/10.3390/agronomy12092069>
- Nasution, M. S. (2025). Pengaruh pola tanam tumpang sari terhadap produktivitas lahan pertanian. *Circle Archive*, 7(1), 1-10.
- Nawaz, A., & Farooq, M. (2016). Nutrient management in dryland agriculture systems. 115-142. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47928-6>
- Nithyapriya, S., Lalitha, S., Sayyed, R. Z., Reddy, M. S., Dailin, D. J., El Enshasy, H. A., Luh Suriani, N., & Herlambang, S. (2021). Production, purification, and characterization of bacillibactin siderophore of *Bacillus subtilis* and its application for improvement in plant

- growth and oil content in sesame. *Sustainability* (Switzerland), 13(10). <https://doi.org/10.3390/su13105394>
- Olo, L., Siahaan, P., & Kolondam, B. (2019). Uji penggunaan PGPR (Plant Growth-Promoting Rhizobacteria) terhadap pertumbuhan vegetatif tanaman cabai merah (*Capsicum Annuum* L.). *Jurnal MIPA*, 8(3), 150. <https://doi.org/10.35799/jmuo.8.3.2019.26172>
- Rahmat, I., Suwardji, & LA Ariabhakti. (2021). RESPON PERTUMBUHAN DAN HASIL TANAMAN INTEGRASI PORANG (*Amorphophallus muelleri* Blume) DAN JAGUNG (*Zea mays* L) AKIBAT PEMBERIAN.... 1(2), 1-11. <http://eprints.unram.ac.id/id/eprint/22743>
- Raza, M. A., Feng, L. Y., van der Werf, W., Iqbal, N., Khan, I., Hassan, M. J., Ansar, M., Chen, Y. K., Xi, Z. J., Shi, J. Y., Ahmed, M., Yang, F., & Yang, W. (2019). Optimum leaf defoliation: A new agronomic approach for increasing nutrient uptake and land equivalent ratio of maize soybean relay intercropping system. *Field Crops Research*, 244(October). <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107647>
- Sainju, U. M., Lenssen, A. W., Caesar-TonThat, T., Jabro, J. D., Lartey, R. T., Evans, R. G., & Allen, B. L. (2012). Dryland soil nitrogen cycling influenced by tillage, crop rotation, and cultural practice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 93(3), 309-322. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9518-9>
- Septiadi, D., & Yusuf, M. (2023). ANALISIS KETAHANAN PANGAN RUMAH TANGGA PETANI LAHAN KERING DI KABUPATEN SUMBAWA: SUATU TINJAUAN PROPORSI PENGELUARAN PANGAN. *Agroteksos*, 33(3), 890-907. <https://doi.org/10.29303/agroteksos.v33i3.986>
- Siti Rohmaniati, B., Sarjan, M., & Suwardji, S. (2024). The effect addition of soil amendments and PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria) on the growth and yield of cotton plants intercropped with corn plants in dry land of North Lombok Regency of Indonesia. *International Journal of Science, Technology & Management*, 5(5), 1059-1066. <https://doi.org/10.46729/ijstm.v5i5.1162>
- Somasundaram, J., Lakaria, B., Saha, R., Sinha, N., Jha, P., Chaudhary, R., Singh, R., Mandal, D., Hati, K., Ramesh, K., Coumar, M., Biswas, A., Dey, P., Reddy, K., & Rao, A. (2014). Management of stressed soils of dryland agriculture in semi-arid tropics: A review. *Indian Journal of Soil Conservation*, 42(2), 178-187.
- Sulfaida Pratami, M. Taufik Fauzi, Suwardji, Taslim Sjah, A.A Sudharmawan, & Mulyati. (2025). Potensi biochar limbah rumput laut dalam meningkatkan kesehatan tanah di lahan kering dan implikasinya terhadap pendapatan petani. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Agrokomplek*, 4(2), 451-457. <https://doi.org/10.29303/jima.v4i2.7395>
- Venkateswarlu, B., Arun K. Shanker, Chitra Shanker, & M. Maheswari. (2012). *Crop stress and its management: Perspectives and strategies* (B. Venkateswarlu, A. K. Shanker, C. Shanker, & M. Maheswari, Eds.). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2220-0>
- Wang, X., Jia, Z., Liang, L., Zhao, Y., Yang, B., Ding, R., Wang, J., & Nie, J. (2018). Changes in soil characteristics and maize yield under straw returning system in dryland farming.

Field Crops Research, 218(November 2017), 11-17.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.12.003>

- Waraich, E. A., Ahmad, R., Yaseen Ashraf, M., Saifullah, S., & Ahmad, M. (2011). Improving agricultural water use efficiency by nutrient management in crop plants. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B: Soil and Plant Science*, 61(4), 291-304. <https://doi.org/10.1080/09064710.2010.491954>
- Yang, C., Fan, Z., & Chai, Q. (2018). Agronomic and economic benefits of pea/maize intercropping systems in relation to N fertilizer and maize density. *Agronomy*, 8(4), 52. <https://doi.org/10.3390/agronomy8040052>
- Zahra, N., Farooq, M., & Siddique, K. H. M. (2021). Strategies for improving water use efficiency in dryland agroecosystems. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 8(4), 599-602. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2021409>