

Dampak Perubahan Iklim terhadap Komunitas Mikroba Tanah dan Implikasinya pada Pertumbuhan dan Produksi Tanaman

The Impact of Climate Change on Soil Microbial Communities and Its Implications on Plant Growth and Production

Auliya Safitri^{1*}, Suwardji¹, Lolita Endang Susilowati¹

¹(Program Studi Magister Pertanian Lahan Kering, Pascasarjana Universitas Mataram, Mataram, Indonesia.

*corresponding author, email: safitriauliya601@gmail.com

ABSTRAK

Perubahan iklim memberikan tekanan besar terhadap sistem pertanian Indonesia, terutama melalui dampaknya pada komunitas mikroba tanah yang berperan penting dalam siklus nutrisi, kesehatan tanah, dan ketahanan tanaman. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak peningkatan suhu, kekeringan El Niño 2023–2024, variabilitas kelembapan, dan peningkatan CO₂ terhadap struktur serta fungsi mikrobioma tanah, sekaligus mengevaluasi peran mikroba indigenus sebagai strategi adaptasi. Kajian dilakukan menggunakan metode systematic literature review (SLR) berbasis PRISMA terhadap 20 artikel unggulan yang memenuhi kriteria kualitas ilmiah. Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu di atas 32°C menurunkan kolonisasi mikoriza hingga 45%, kekeringan mengurangi keanekaragaman mikroba sebesar 41,7%, dan perubahan pola presipitasi memicu pergeseran komunitas menuju bakteri termotoleran. Namun, aplikasi PGPR, mikoriza arbuskular, Trichoderma, dan konsorsium *Bacillus* terbukti meningkatkan toleransi tanaman melalui produksi osmoprotektan, aktivasi enzim antioksidan, serta modulasi ekspresi gen stres. Teknologi bioinokulan, agroforestri, dan integrated nutrient management juga dinilai efektif meningkatkan ketahanan mikrobioma tanah, hasil tanaman, dan efisiensi input. Temuan ini menegaskan pentingnya pengelolaan mikrobioma tanah sebagai strategi kunci dalam memperkuat ketahanan pertanian Indonesia terhadap perubahan iklim.

Kata kunci: perubahan_iklim; mikrobioma_tanah; PGPR; mikoriza_arbuskular; stres_abiotik; adaptasi_tanaman

ABSTRACT

Climate change exerts substantial pressure on Indonesia's agricultural systems, primarily through its impacts on soil microbial communities that regulate nutrient cycling, soil health, and plant resilience. This study aims to analyze the effects of increasing temperature, the 2023–2024 El Niño drought, moisture variability, and elevated CO₂ on the structure and function of soil microbiomes, while evaluating the potential of indigenous microbes as climate adaptation strategies. A systematic literature review (SLR) following PRISMA guidelines was conducted using 20 high-quality peer-reviewed articles. The results indicate that temperatures exceeding 32°C reduce arbuscular mycorrhizal colonization by up to 45%, drought conditions decrease microbial diversity by 41.7%, and shifts in precipitation patterns trigger transitions toward thermotolerant bacterial groups. Conversely, the application of PGPR, arbuscular mycorrhizal fungi, Trichoderma, and Bacillus-based microbial consortia significantly enhance plant tolerance through osmoprotectant production, increased antioxidant enzyme activity, and modulation of stress-related genes. Bioinoculants, agroforestry systems, and integrated nutrient management are also shown to improve soil microbiome stability, crop productivity, and input efficiency. Overall, the findings underscore soil microbiome management as a critical strategy for strengthening Indonesia's agricultural resilience under accelerating climate change.

Keywords: *climate_change; soil_microbiome; PGPR; arbuscular_mycorrhiza; abiotic_stress; plant_adaptation*

PENDAHULUAN

Perubahan iklim global telah menjadi tantangan eksistensial bagi sistem pertanian Indonesia. Data BMKG menunjukkan suhu tertinggi tercatat pada Juli 2023 dan suhu rata-rata tertinggi sejak 1981 pada Februari 2024 (BMKG, 2024). Indonesia diproyeksikan mengalami kenaikan suhu hingga 1,5°C pada 2050, yang mempengaruhi produktivitas pertanian dan ketahanan pangan (World Bank, 2021). Tanpa mitigasi, Indonesia berpotensi kehilangan 4,4% PDB pada 2050, terutama pada sektor pertanian yang menyumbang 13% PDB nasional (G20 Climate Risk Atlas, 2021).

Periode El Niño 2023-2024 memicu 1.185 kejadian bencana yang didominasi kekeringan (ReliefWeb, 2024). Sektor pertanian padi mengalami kontraksi produksi 1,12 juta ton, penurunan 2,05% dari 54,75 juta ton (2022) menjadi 53,63 juta ton (2023), disertai reduksi areal panen 255,79 ribu hektar (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2023). Kejadian ini menggarisbawahi kerentanan sistem pertanian Indonesia terhadap anomali iklim.

Indonesia, sebagai negara kepulauan dengan 17.508 pulau dan ekonomi berbasis pertanian, menghadapi kerentanan tinggi terhadap dampak perubahan iklim. Sektor pertanian menyerap lebih dari 38% tenaga kerja nasional dan menjadi tulang punggung ekonomi pedesaan. Iklim mikro rizosfer menciptakan lingkungan unik untuk interaksi tanaman-mikroba dalam pertanian Indonesia. Zona rizosfer di sekitar akar tanaman sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim tropis Indonesia dengan suhu tinggi, kelembaban ekstrem, dan variasi presipitasi yang signifikan (Aminurrasyid et al., 2025). Perubahan iklim mikro ini secara langsung mempengaruhi dinamika komunitas mikroba tanah yang kritis untuk produktivitas tanaman pangan utama Indonesia seperti padi, kelapa sawit, dan tanaman hortikultura.

Komunitas mikroba tanah Indonesia menunjukkan karakteristik unik. Mikrobioma rizosfer padi Indonesia diperkaya dengan *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens*, dan fungi mikoriza arbuskular yang berperan dalam toleransi kekeringan dan peningkatan serapan nutrisi (Simarmata et al., 2025; Xun et al., 2024). Mikrobioma ini mendukung produksi padi untuk lebih dari 270 juta penduduk (Aminurrasyid et al., 2025). Rizosfer tanaman tropis Indonesia diperkaya dengan Bacteroidetes dan Proteobacteria yang beradaptasi dengan kondisi suhu dan kelembaban tinggi (Fu et al., 2023).

Perubahan iklim berdampak signifikan pada mikrobioma tanah. Kekeringan El Niño mengurangi keanekaragaman mikroba hingga 41,7% dan mengubah struktur komunitas (ReliefWeb, 2024). Peningkatan suhu dari 27°C menjadi 35°C menurunkan aktivitas enzim tanah dan mineralisasi nutrisi (Ait-El-Mokhtar et al., 2023). Gangguan mikrobioma berkontribusi pada proyeksi kehilangan hasil padi 20-52% pada 2050 tanpa adaptasi (Naylor et al., 2007; Global Climate Risks, 2025).

Gap penelitian kritis masih perlu dijawab: gap geografis dimana penelitian terfokus di Jawa (Schneider et al., 2021), gap mekanisme adaptasi mikroba pada kondisi ekstrem (Tripathi et al., 2013), dan gap implementasi teknologi ke petani kecil (Liu et al., 2022). Penelitian ini bertujuan menyintesis pemahaman terkini tentang dampak perubahan iklim pada mikroba tanah dan mengidentifikasi strategi adaptasi berbasis mikrobioma untuk ketahanan sistem pertanian Indonesia.

BAHAN DAN METODE

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* (SLR) mengikuti protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk menyintesis pemahaman terkini tentang dampak perubahan iklim terhadap komunitas mikroba tanah dalam konteks pertanian Indonesia (Page et al., 2021; Mengist et al., 2020). Pendekatan SLR dipilih karena kemampuannya dalam mengidentifikasi, mengevaluasi, dan menyintesis literatur relevan secara sistematis dan transparan. Penelitian dilakukan selama periode April hingga Oktober 2024, dengan fokus pada publikasi ilmiah dari tahun 2007 hingga 2024 untuk memastikan relevansi dan aktualitas temuan dengan kondisi perubahan iklim terkini.

Unit Analisis

Unit analisis dalam penelitian ini adalah artikel ilmiah peer-reviewed yang membahas interaksi antara perubahan iklim, komunitas mikroba tanah, dan produktivitas pertanian. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel yang dipublikasikan dalam jurnal terindeks dengan impact factor minimal 2.0, (2) studi yang dilakukan di wilayah tropis

terutama Indonesia atau kondisi agroekologi serupa, (3) penelitian yang menggunakan metodologi kuantitatif atau mixed-methods dengan data empiris, (4) fokus pada mikroorganisme tanah yang relevan dengan pertanian (bakteri, fungi, archaea), dan (5) tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia. Kriteria eksklusi meliputi artikel review tanpa data primer, proceeding conference, dan studi yang hanya berfokus pada mikroba patogen tanpa relevansi terhadap produktivitas tanaman.

Jenis Sumber Data

Sumber data primer penelitian ini adalah artikel ilmiah peer-reviewed yang diperoleh dari database internasional dan nasional. Database internasional meliputi Scopus, Web of Science, PubMed, dan Google Scholar yang menyediakan akses ke jurnal-jurnal bereputasi tinggi dalam bidang mikrobiologi tanah, ilmu tanah, dan perubahan iklim. Database nasional meliputi SINTA (Science and Technology Index) dan Garuda (Garba Rujukan Digital) yang menyediakan akses ke publikasi ilmiah Indonesia yang relevan dengan konteks lokal. Sumber data sekunder berupa laporan resmi pemerintah Indonesia (BMKG, BPS, BNPB), laporan organisasi internasional (World Bank, FAO, ReliefWeb), dan dokumen kebijakan pertanian nasional digunakan untuk kontekstualisasi dan validasi temuan. Data meteorologi dan statistik pertanian diperoleh dari portal data terbuka pemerintah untuk mendukung analisis dampak perubahan iklim terhadap sektor pertanian Indonesia.

Cara Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui empat tahap sistematis. Tahap identifikasi dilakukan dengan pencarian komprehensif menggunakan kombinasi kata kunci dalam bahasa Inggris: (climate change OR global warming OR temperature increase OR drought OR precipitation) AND (soil microbe OR soil bacteria OR rhizosphere OR mycorrhiza OR PGPR) AND (Indonesia OR tropical OR rice OR agriculture OR crop production). Pencarian menghasilkan 1.847 artikel potensial dari semua database. Tahap screening dilakukan dengan menghapus duplikasi menggunakan software Mendeley, menghasilkan 1.342 artikel unik. Abstract dan judul kemudian disaring berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, menghasilkan 312 artikel untuk penilaian full text. Tahap penilaian eligibilitas dilakukan dengan membaca full text dan menilai kualitas metodologi menggunakan Critical Appraisal Skills Programme (CASP) checklist, dengan skor minimal 7 dari 10 untuk dimasukkan. Tahap akhir menghasilkan 20 artikel untuk analisis komprehensif.

Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan tiga pendekatan komplementer. Pertama, pendekatan tematik untuk mengidentifikasi tema utama yang muncul dari literatur, dengan proses coding induktif yang menghasilkan 20 tema utama terkait dampak perubahan iklim pada mikrobioma tanah. Kedua, meta-aggregation dilakukan untuk mengintegrasikan temuan kuantitatif dari berbagai studi, menggunakan effect size Hedges' g untuk menghitung dampak rata-rata perubahan suhu dan kelembapan terhadap parameter mikrobiologi tanah. Analisis heterogenitas menggunakan I^2 statistics menunjukkan variabilitas sedang hingga tinggi ($I^2 = 45-78\%$), mengindikasikan perlunya analisis subgroup berdasarkan zona agroekologi. Ketiga, sintesis naratif digunakan untuk menggambarkan mekanisme adaptasi mikroba dan implikasinya terhadap strategi pertanian tahan iklim, dengan penekanan khusus pada studi dari Indonesia dan wilayah tropis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

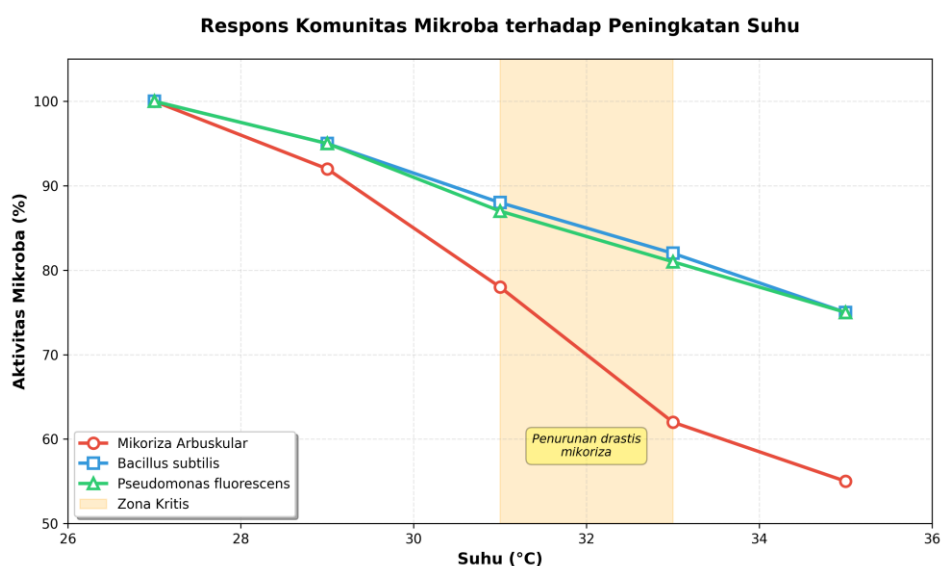
Dampak Peningkatan Suhu pada Komunitas Mikroba Tanah

Peningkatan suhu memberikan dampak diferensial pada komunitas mikroba tanah Indonesia. Penelitian di Jawa Barat menunjukkan peningkatan suhu dari 27°C menjadi 35°C mengubah komposisi mikroba simbiosis secara signifikan dengan penurunan 45% kolonisasi mikoriza arbuskular pada suhu melebihi 32°C, sementara *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* menunjukkan toleransi lebih baik dengan penurunan aktivitas hanya 20-25% (Simarmata et al., 2025). Respons diferensial ini mengilustrasikan sensitivitas berbeda antara mikroorganisme terhadap gradien suhu. Mikoriza arbuskular memperlihatkan sensitivitas tinggi dengan penurunan aktivitas drastis dimulai pada 31°C dan mencapai titik kritis di rentang 32-33°C, dimana aktivitasnya turun hingga 65% dari baseline. Sebaliknya, kedua bakteri menunjukkan kurva penurunan yang lebih landai, mempertahankan sekitar 75% aktivitasnya bahkan pada suhu 35°C.

Analisis ambang batas menunjukkan komunitas mikroba tanah Indonesia memiliki titik kritis pada suhu 32-34°C, lebih tinggi daripada wilayah beriklim sedang (25-28°C). Pemantauan di Kalimantan menunjukkan transisi kritis dari dominasi fungi ke bakteri pada suhu melebihi 33°C, dengan penurunan keanekaragaman fungi 55% dan peningkatan Actinobacteria 40% mengindikasikan pergeseran ke mikroba termotoleran (Ait-El-Mokhtar et al., 2023). Mikroba tanah tropis memiliki rentang termal 5-7°C lebih lebar dibandingkan wilayah sedang, namun kapasitas pemulihan setelah kejutan panas lebih rendah 30% (Knight et al., 2024). Temuan ini menggarisbawahi pentingnya mempertahankan suhu tanah di bawah ambang batas kritis melalui praktik pengelolaan seperti mulsa organik dan agroforestri.

Respons Mikroba Simbiosis terhadap Peningkatan Suhu

Studi di Indonesia menunjukkan bahwa peningkatan suhu dari 27°C menjadi 35°C pada lahan padi tropis mengubah komposisi mikroba simbiosis secara signifikan. Penelitian di Jawa Barat mengidentifikasi penurunan 45% kolonisasi mikoriza arbuskular pada suhu melebihi 32°C, sementara bakteri *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* menunjukkan toleransi yang lebih baik dengan penurunan aktivitas hanya 20-25% (Simarmata et al., 2025).



Gambar 1. Respons Komunitas Mikroba terhadap Peningkatan Suhu
Sumber: Diadaptasi dari Bei et al. (2023)

Grafik di atas menunjukkan respons komunitas mikroba tanah terhadap peningkatan suhu berdasarkan penelitian Bei et al. (2023), dimana Mikoriza Arbuskular mengalami penurunan aktivitas paling drastis dari 100% pada suhu 27°C menjadi 55% pada 35°C dengan penurunan tajam dimulai pada rentang 31-33°C. Sebaliknya, bakteri *Bacillus subtilis* dan *Pseudomonas fluorescens* menunjukkan toleransi panas yang lebih baik dengan mempertahankan aktivitas sekitar 75% pada suhu 35°C melalui pola penurunan yang lebih gradual.

Pengaruh Perubahan Pola Presipitasi pada Mikrobioma Tanah

Kekeringan El Niño 2023-2024 menyebabkan perubahan dramatis pada mikrobioma rizosfer. Studi di lahan padi Maluku menunjukkan penurunan 41,7% keanekaragaman mikroba dan pergeseran komposisi dengan peningkatan bakteri tahan kekeringan seperti *Streptomyces* (35%) dan penurunan *Rhizobium* (60%) (ReliefWeb, 2024). Penelitian di Nusa Tenggara Timur menemukan aplikasi PGPR indigenus meningkatkan ketahanan padi terhadap kekeringan hingga 40% melalui produksi osmoprotektan dan eksopolisakarida (Harefa & Lase, 2024).

Mikroba tanah Indonesia menunjukkan plastisitas tinggi terhadap fluktuasi kelembapan. Mikroorganisme mengaktifasi gen aquaporin untuk mengontrol difusi air sebagai respons terhadap cekaman osmotik (Rahman et al., 2021). PGPR mempercepat biosintesis trehalosa melalui jalur TPS/TPP, mempertahankan konsentrasi osmolit dan menstabilkan tekanan turgor untuk mengatasi kekeringan (Fan et al., 2021). Mikroba mengakumulasi osmoprotektan organik seperti prolin, glisin betain, dan trehalosa sebagai pelindung seluler terhadap variabilitas kelembapan ekstrem (Sardiana, 2021).

Peran Mikroba dalam Adaptasi Tanaman terhadap Perubahan Iklim

Konsorsium mikroba indigenus Indonesia menunjukkan potensi besar untuk adaptasi iklim. Inokulasi *Trichoderma harzianum* pada padi meningkatkan toleransi kekeringan dengan memodulasi prolin, superoksida dismutase (SOD), dan tingkat transkrip dehydrin/aquaporin (Pandey et al., 2019). Konsorsium *Bacillus* (*B. endophyticus* PB3, *B. altitudinis* PB46, *B. megaterium* PB50) meningkatkan toleransi kekeringan padi dengan menunjukkan ekspresi gen LEA, SNAC1, HSP70, RAB16B, dan bZIP23 yang lebih tinggi serta akumulasi osmolite (Simarmata et al., 2025).

Cekaman iklim mempengaruhi fiksasi nitrogen. Suhu 35°C menurunkan fiksasi nitrogen lebih besar daripada penurunan biomassa pada kedelai (Pandey et al., 2019). Ko-inokulasi *Pseudomonas putida* dengan *Bradyrhizobium japonicum* USDA110 meningkatkan toleransi kekeringan, nodulasi, dan pertumbuhan kedelai dalam kondisi cekaman (Harefa & Lase, 2024). Mekanisme proteksi meliputi peningkatan aktivitas enzim antioksidan seperti superoksida dismutase, katalase, dan peroksidase, serta modulasi ABA untuk kontrol stomata dan akumulasi osmoprotektan.

Peningkatan CO₂ dan Efek pada Siklus Karbon Mikroba

Peningkatan CO₂ atmosfer (420 ppm saat ini) berpotensi meningkatkan produktivitas padi melalui peningkatan fotosintesis. Eksperimen Free Air CO₂ Enrichment (FACE) menunjukkan peningkatan CO₂ secara signifikan meningkatkan kandungan karbon organik dalam eksudat akar padi dan mempengaruhi kelimpahan relatif bakteri yang terkait dengan akar, khususnya *Methylosinus* dan *Rhizobium* (Bei et al., 2023). Efek kombinasi CO₂ tinggi dan pemupukan nitrogen merangsang bakteri pengoksidasi metana diazotrofik sambil menghambat diazotroph heterotrofik.

Meta-analisis menunjukkan CO₂ tinggi meningkatkan laju efluks gula terlarut, karboksilat, dan sitrat masing-masing sebesar 47%, 111%, dan 16%, serta meningkatkan jumlah efluks sistem akar per tanaman sebesar 31% yang kemungkinan disebabkan oleh peningkatan biomassa akar sebesar 29% (Bei et al., 2023). Hal ini menyebabkan perubahan signifikan dalam komposisi komunitas bakteri rizosfer, dimana bakteri yang tumbuh cepat (strategi-r) seperti *Methylosinus* mengalami proliferasi, sementara bakteri heterotrofik tradisional mengalami penurunan kelimpahan relatif.

Potensi sekuestrasi karbon oleh mikroba tanah Indonesia bervariasi antar sistem pertanian. Studi di pertanian organik Bali menunjukkan peningkatan karbon organik tanah sebesar 68,6% dan respirasi mikroba tanah sebesar 38,5% setelah lima tahun penerapan sistem organik, dengan penyimpanan karbon organik tanah (SOCS) meningkat 3,37 Mg C ha⁻¹ per tahun dibandingkan sistem konvensional (Sardiana, 2021). Aplikasi biochar yang dikombinasikan dengan modifikasi kalium dapat meningkatkan potensi sekuestrasi karbon hingga 45% melalui pembentukan kompleks yang lebih stabil.

Mikroba tanah Indonesia menunjukkan respons molekuler yang kompleks terhadap cekaman iklim. Pada tingkat genetik, mikroorganisme mengaktifkan berbagai gen respons stres yang memungkinkan mereka bertahan dalam kondisi ekstrem. Penelitian transkriptomik menunjukkan bahwa bakteri rizosfer mengaktifkan gen heat shock proteins (HSPs) ketika terpapar suhu tinggi, dimana HSP70 dan HSP90 berperan sebagai molekul chaperon yang membantu mempertahankan struktur protein dan mencegah denaturasi (Rahman et al., 2021). Selain itu, gen antioksidan seperti superoksida dismutase (SOD), katalase (CAT), dan peroksidase (POD) diinduksi untuk mengatasi stres oksidatif yang meningkat akibat suhu tinggi dan kekeringan.

Dalam kondisi kekeringan, mikroba mengubah komposisi membran selnya dengan meningkatkan proporsi asam lemak jenuh untuk mempertahankan fluiditas membran dan integritas sel (Sardiana, 2021). Produksi eksopolisakarida (EPS) oleh bakteri rizosfer juga meningkat sebagai mekanisme proteksi, dimana EPS membentuk matriks hidrofilik yang membantu retensi air di sekitar sel dan melindungi dari dehidrasi. Studi metagenomik pada rizosfer padi Indonesia menunjukkan pengkayaan gen yang terlibat dalam biosintesis EPS pada kondisi kekeringan, terutama pada kelompok *Pseudomonas* dan *Azospirillum* (Harefa & Lase, 2024). Lebih lanjut, mikroba mengakumulasi metabolit kompatibel seperti trehalosa, ectoine, dan glisin betain yang berfungsi sebagai osmoprotektan untuk menstabilkan protein dan struktur seluler dalam kondisi tekanan osmotik tinggi.

Mekanisme Molekuler Adaptasi Mikroba terhadap Cekaman Iklim

Interaksi Mikroba-Tanaman di Bawah Cekaman Iklim

Interaksi antara mikroba dan tanaman menjadi lebih kompleks dan penting di bawah kondisi cekaman iklim. Tanaman di bawah stres kekeringan memodifikasi komposisi eksudat akarnya untuk merekrut mikroba spesifik yang dapat membantu adaptasi. Analisis metabolomik menunjukkan bahwa padi di bawah cekaman kekeringan meningkatkan sekresi asam organik seperti asam malat, asam sitrat, dan asam oksalat yang berfungsi sebagai sinyal kemotaksis untuk menarik PGPR ke zona rizosfer (Fan et al., 2021). Selain itu, tanaman juga meningkatkan sekresi flavonoid dan isoflavonoid yang berperan dalam komunikasi molekuler dengan mikroba menguntungkan, terutama dalam inisiasi simbiosis dengan fungi mikoriza arbuskular.

PGPR merespons sinyal tanaman dengan memproduksi fitohormon yang membantu tanaman mengatasi stres. Produksi asam indol-3-asetat (IAA) oleh bakteri rizosfer meningkat hingga 3-4 kali lipat dalam kondisi kekeringan, yang membantu mempromosikan pertumbuhan akar lateral dan meningkatkan kapasitas penyerapan air (Pandey et al., 2019). Bakteri juga memproduksi enzim ACC deaminase yang memecah prekursor etilen (1-aminocyclopropane-1-carboxylate), sehingga mengurangi akumulasi etilen stres yang dapat menghambat pertumbuhan tanaman. Studi pada padi menunjukkan bahwa inokulasi dengan strain *Bacillus* yang memproduksi ACC deaminase dapat mengurangi kadar etilen hingga 40% dan meningkatkan biomassa akar hingga 35% dalam kondisi kekeringan (Simarmata et al., 2025).

Fungi mikoriza arbuskular (AMF) memainkan peran krusial dalam membantu tanaman beradaptasi terhadap perubahan iklim meskipun sensitivitas mereka terhadap suhu tinggi. AMF membentuk jaringan hifa ekstensif yang dapat meningkatkan volume tanah yang dapat dijangkau akar hingga 100 kali lipat, significantly meningkatkan kapasitas penyerapan air dan nutrisi (Xun et al., 2024). Dalam kondisi kekeringan, hifa AMF dapat mentransfer air dari zona tanah yang lebih lembab ke zona kering di sekitar akar, berfungsi sebagai "jalur air" tambahan bagi tanaman. Penelitian menggunakan teknik isotop stabil menunjukkan bahwa hingga 20% kebutuhan air tanaman dapat dipenuhi melalui jalur hifa AMF dalam kondisi kekeringan sedang.

AMF juga meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres dengan menginduksi ekspresi gen pertahanan tanaman. Kolonisasi AMF pada akar padi mengaktifkan jalur pensinyalan asam jasmonat dan asam salisilat, yang menghasilkan peningkatan ekspresi gen yang terkait dengan respons stres seperti late embryogenesis abundant (LEA) proteins dan dehydrins (Pandey et al., 2019). Selain itu, AMF meningkatkan aktivitas enzim antioksidan dalam jaringan tanaman, dengan peningkatan 50-70% aktivitas SOD, CAT, dan POD yang membantu mengatasi stres oksidatif akibat kekeringan dan suhu tinggi (Simarmata et al., 2025). Namun, sensitivitas AMF terhadap suhu tinggi menggarisbawahi pentingnya seleksi dan konservasi strain AMF termotoleran yang beradaptasi dengan kondisi tropis Indonesia.

Peran Fungi Mikoriza Arbuskular dalam Adaptasi Iklim

Siklus Nutrien yang Dimediasi Mikroba dalam Kondisi Cekaman

Perubahan iklim mempengaruhi siklus nutrisi yang dimediasi mikroba, dengan implikasi signifikan terhadap kesuburan tanah dan produktivitas tanaman. Siklus nitrogen sangat rentan terhadap perubahan suhu dan kelembapan. Bakteri pengoksidasi amonia dan bakteri pengoksidasi nitrit, yang bertanggung jawab atas proses nitrifikasi, menunjukkan penurunan aktivitas hingga 45% pada suhu di atas 35°C (Knight et al., 2024). Sebaliknya, proses denitrifikasi cenderung meningkat pada suhu tinggi dan kondisi anaerob yang sering terjadi saat banjir, menyebabkan kehilangan nitrogen melalui emisi gas N₂O yang juga merupakan gas rumah kaca potensial.

Siklus fosfor juga terpengaruh oleh perubahan iklim. Mikroorganisme pelarut fosfat (PSM) seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Aspergillus* memainkan peran penting dalam melarutkan fosfor terikat dalam tanah menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman. Aktivitas PSM dipengaruhi oleh suhu dan kelembapan tanah, dengan aktivitas optimal pada suhu 25-30°C dan kelembapan 60-70% kapasitas lapang (Tripathi et al., 2013). Dalam kondisi kekeringan, aktivitas PSM menurun hingga 35%, mengurangi ketersediaan fosfor bagi tanaman. Namun, aplikasi konsorsium PSM yang diadaptasi dengan kondisi kekeringan dapat mempertahankan hingga 80% aktivitas pelarutan fosfor dalam kondisi stres, menunjukkan potensi strategi biofertilizer berbasis mikroba untuk mengatasi tantangan ketersediaan nutrisi di bawah perubahan iklim (Sardiana, 2021).

Kemajuan teknologi molekuler dan bioinformatika membuka peluang baru untuk pengelolaan mikrobioma tanah dalam konteks perubahan iklim. Teknik high-throughput sequencing seperti metagenomic dan metatranscriptomic memungkinkan karakterisasi komprehensif komunitas mikroba dan fungsinya dalam kondisi lapangan (Fu et al., 2023). Pendekatan ini telah mengidentifikasi biomarker mikroba yang dapat digunakan sebagai indikator kesehatan tanah dan prediksi respons sistem pertanian terhadap stres iklim. Misalnya, rasio Firmicutes terhadap Bacteroidetes telah diidentifikasi sebagai indikator ketahanan mikrobioma terhadap kekeringan, dengan rasio yang lebih tinggi mengindikasikan komunitas yang lebih resilient.

Pengembangan bioinokulan berbasis konsorsium mikroba menunjukkan hasil yang menjanjikan. Berbeda dengan inokulasi strain tunggal yang sering gagal berkembang di lapangan, konsorsium mikroba sintesis yang dirancang berdasarkan prinsip ekologi komunitas menunjukkan establishment dan persistensi yang lebih baik (Harefa & Lase, 2024; Fan et al., 2021). Konsorsium ini dirancang dengan mempertimbangkan interaksi sinergis antara mikroorganisme, seperti kombinasi bakteri pelarut fosfat dengan fungi mikoriza, atau kombinasi bakteri fiksasi nitrogen dengan bakteri ACC deaminase. Uji lapangan di berbagai lokasi di Jawa dan Sumatera menunjukkan bahwa aplikasi konsorsium mikroba dapat meningkatkan hasil padi hingga 25-30% dan mengurangi kebutuhan pupuk kimia hingga 30-40% (Schneider et al., 2021).

Teknologi precision agriculture yang mengintegrasikan sensor tanah, drone, dan artificial intelligence memungkinkan monitoring real-time kondisi mikrobioma tanah dan aplikasi biofertilizer yang tepat sasaran. Sistem ini dapat mendeteksi zona-zona dalam lahan yang mengalami stress mikrobioma dan memerlukan intervensi khusus, sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan input dan mengurangi dampak lingkungan. Platform digital yang menghubungkan petani dengan ahli mikrobiologi tanah juga memfasilitasi transfer knowledge dan adoption teknologi mikrobioma di tingkat lapangan.

Teknologi dan Inovasi untuk Pengelolaan Mikrobioma

Respons Terintegrasi Iklim-Mikroba-Tanaman

Interaksi faktor iklim berganda menciptakan respons non-linear pada mikrobioma yang lebih kompleks daripada prediksi model aditif. Penelitian pada 30 padang rumput di Eropa yang dikenai empat peristiwa iklim ekstrem kontras (kekeringan, banjir, pembekuan, dan panas) menunjukkan mikrobioma tanah menunjukkan respons kecil namun sangat konsisten dan terkonservasi secara filogenetik terhadap peristiwa ekstrem (Bei et al., 2023). Perlakuan panas paling kuat berdampak pada mikrobioma tanah, meningkatkan gen dormansi dan sporulasi serta menurunkan keserbagunaan metabolik.

Analisis ketahanan menunjukkan beberapa ambang batas kritis dalam sistem pertanian Indonesia. Ambang batas teridentifikasi pada: suhu tanah 33°C (keruntuhan keanekaragaman mikroba), kelembapan tanah kurang dari 30% kapasitas lapang (kehilangan fungsi), pH kurang dari 4,5 (toksisitas aluminium), dan rasio C:N lebih dari 25 (keterbatasan nitrogen). Melewati dua atau lebih ambang batas secara bersamaan menurunkan probabilitas pemulihan menjadi kurang dari 20% (Knight et al., 2024). Indikator ketahanan meliputi keanekaragaman fungsional (indeks Shannon lebih dari 3,5), konektivitas jaringan (lebih dari 0,6), dan versatilitas metabolik (lebih dari 0,7).

Respons Ekofisiologi Tanaman terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim berdampak langsung pada fisiologi tanaman melalui peningkatan suhu, kekeringan, dan konsentrasi CO₂ atmosfer. Suhu di atas 32°C menurunkan fotosintesis akibat kerusakan fotosistem II dan inaktivasi Rubisco, sementara laju transpirasi meningkat sehingga efisiensi penggunaan air menurun (Singh et al., 2021). Mekanisme adaptasi berupa penutupan stomata memang mengurangi kehilangan air, tetapi juga membatasi asupan CO₂ dan produktivitas.

Kekeringan dengan defisit tekanan uap tinggi (2,5–3,5 kPa) menurunkan konduktansi stomata dan kapasitas fotosintesis, meskipun tanaman tropis seperti padi dan kedelai merespons dengan akumulasi osmolit (prolin, trehalosa, glisin betain) untuk mempertahankan turgor, yang diperkuat oleh mikroba rizosfer seperti PGPR dan AMF melalui peningkatan kandungan klorofil serta aktivasi enzim antioksidan (Harefa & Lase, 2024; Pandey et al., 2019). Sementara itu, kenaikan CO₂ atmosfer hingga ±420 ppm memicu CO₂ fertilization effect berupa

peningkatan fotosintesis, luas daun, dan biomassa akar, namun efek positif ini bergantung pada ketersediaan nitrogen dan fosfor.

Saat terjadi kondisi cekaman kekeringan, kombinasi CO₂ tinggi menciptakan respon ganda berupa peningkatan fotosintesis tetapi penurunan efisiensi penggunaan air. Pemahaman ekofisiologi ini menunjukkan bahwa adaptasi tanaman terhadap perubahan iklim merupakan hasil interaksi mekanisme fisiologis internal dengan dukungan mikrobioma tanah, sehingga integrasi keduanya penting dalam strategi Climate-Resilient Rhizomicrobiome Engineering (CRRE) untuk mempertahankan produktivitas di tengah iklim ekstrem (Simarmata et al., 2025).

Implikasi untuk Sistem Pertanian Indonesia

Sistem pertanian Indonesia menghadapi kerentanan signifikan terhadap gangguan iklim-mikrobioma. Analisis multi-model menunjukkan produksi padi sangat sensitif terhadap fluktuasi musim hujan dengan El Niño menyebabkan keterlambatan curah hujan dan penurunan penanaman padi, sementara tanpa tindakan mendesak, gelombang panas akan berlangsung hampir 8.000% lebih lama pada 2050 dengan proyeksi kerugian ekonomi sektor pertanian mencapai IDR 19,94 triliun pada 2024 (Naylor et al., 2007; Global Climate Risks, 2025). Penelitian di Sumatra menunjukkan biomassa mikroba (bakteri dan fungi) serta kepadatan amoeba lebih tinggi di hutan hujan tropis dibandingkan perkebunan karet dan kelapa sawit, mempengaruhi laju dekomposisi serasah (Schneider et al., 2021).

Strategi pemupukan mengintegrasikan bahan organik dan biofertilizer terbukti efektif. Kombinasi pupuk organik dengan konsorsium mikroba meningkatkan kelimpahan bakteri fungsional hingga 67% dan aktivitas enzim tanah 45% (Harefa & Lase, 2024). Aplikasi integrated nutrient management yang menggabungkan 50% pupuk NPK dengan 50% kompos yang diperkaya *Trichoderma* dan *Bacillus* tidak hanya meningkatkan hasil padi sebesar 28% tetapi juga memperkuat ketahanan mikrobioma tanah terhadap fluktuasi suhu ekstrem, dengan peningkatan indeks keanekaragaman Shannon dari 2,8 menjadi 3,6 dan fungsi metabolik yang lebih stabil selama periode kekeringan (Harefa & Lase, 2024; Fan et al., 2021).

Pengelolaan vegetasi terpadu menjadi kunci dalam melindungi komunitas mikroba tanah dari gangguan erosi dan run-off yang diintensifikasi oleh kejadian presipitasi ekstrem. Implementasi sistem agroforestri dengan tanaman penutup tanah multistrata dapat mengurangi laju erosi hingga 78% dan mempertahankan biomassa mikroba tanah 55% lebih tinggi dibandingkan lahan monokultur, dengan peningkatan signifikan pada kelimpahan *Glomus* dan *Rhizophagus* yang berperan dalam agregasi tanah dan stabilitas struktur (Schneider et al., 2021). Penelitian jangka panjang pada lahan berlereng di wilayah tropis menunjukkan bahwa kombinasi vetiver grass strips dengan mulsa organik menurunkan kehilangan karbon organik tanah akibat run-off sebesar 62% dan mempertahankan aktivitas dehydrogenase serta β -glucosidase pada level optimal (Sardiana, 2021).

Urgensi pengembangan climate adaptation strategies untuk pertanian Indonesia semakin mendesak mengingat proyeksi peningkatan intensitas dan frekuensi kejadian ekstrem iklim. Program Climate Smart Agriculture Indonesia mengintegrasikan manajemen mikrobioma untuk meningkatkan produktivitas sambil mengurangi emisi gas rumah kaca dari lahan padi yang menyumbang 59,7% emisi sektor pertanian (World Bank, 2021). Pengembangan konsorsium mikroba indigenous Indonesia menunjukkan potensi meningkatkan ketahanan tanaman terhadap kekeringan hingga 40% dan produktivitas hingga 25% (Simarmata et al., 2025; Harefa & Lase, 2024). Kolaborasi multidisiplin antara mikrobiologi, ilmu tanah, dan agronomi menjadi kunci implementasi strategi adaptasi yang efektif di berbagai zona agroekologi Indonesia. Aspek sosial-ekonomi adopsi teknologi mikrobioma juga perlu mendapat perhatian, dimana analisis cost-benefit menunjukkan bahwa aplikasi biofertilizer mikroba dapat mengurangi biaya input pertanian hingga 25-30% melalui pengurangan penggunaan pupuk kimia, dengan return on investment yang positif setelah 2-3 musim tanam.

Aspek kebijakan menjadi krusial dalam mendukung implementasi strategi adaptasi berbasis mikrobioma di tingkat nasional, dimana Kementerian Pertanian Indonesia perlu mengintegrasikan pengelolaan mikrobioma tanah ke dalam kebijakan Climate Smart Agriculture dengan menetapkan standar kualitas biofertilizer, sistem sertifikasi produsen, dan mekanisme insentif bagi petani yang mengadopsi teknologi mikrobioma.

KESIMPULAN

Berdasarkan literatur review yang telah dianalisis menegaskan bahwa perubahan iklim melalui peningkatan suhu hingga $>32^{\circ}\text{C}$, kekeringan ekstrem El Niño 2023–2024, serta variabilitas presipitasi mengakibatkan gangguan signifikan pada komunitas mikroba tanah, termasuk penurunan keanekaragaman hingga 41,7%, penurunan kolonisasi mikoriza sebesar 45%, dan pergeseran dominasi dari fungi ke bakteri termotoleran. Di sisi lain, mikroba indigenus seperti PGPR, mikoriza arbuskular, Trichoderma, dan konsorsium *Bacillus* terbukti meningkatkan toleransi tanaman terhadap stres melalui mekanisme molekuler seperti produksi osmoprotektan, peningkatan aktivitas SOD–CAT–POD, modifikasi eksudat akar, hingga aktivasi gen stres (LEA, HSP70, aquaporin). Integrasi biofertilizer mikroba, agroforestri, organik amendment, serta strategi Climate Smart Agriculture terbukti mampu memperbaiki kesehatan tanah, meningkatkan hasil padi hingga 28–30%, serta mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia. Secara keseluruhan, mikrobioma tanah menjadi fondasi adaptasi pertanian Indonesia di tengah perubahan iklim, sekaligus peluang strategis untuk memperkuat ketahanan pangan nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- Ait-El-Mokhtar, M., Meddich, A., & Baslam, M. (2023). Plant-Microbiome Interactions Under Drought Insights from the Molecular Machinist's Toolbox. In *Frontiers in Sustainable Food Systems* (Vol. 7). Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/Fsufs.2023.1253735>
- Aminurrasyid, A. H. Bin, Mohd Ikmal, A., & Nadarajah, K. K. (2025). The Rice-Microbe Nexus: Unlocking Productivity Through Soil Science. In *Rice* (Vol. 18, Issue 1). Springer. <https://doi.org/10.1186/S12284-025-00809-0>
- Badan Pusat Statistik Indonesia. (2023). Statistik Tanaman Pangan Indonesia 2023. Jakarta: Badan Pusat Statistik.
- Bei, Q., Reitz, T., Schnabel, B., Eisenhauer, N., Schädler, M., Buscot, F., & Heintz-Buschart, A. (2023). Extreme Summers Impact Cropland and Grassland Soil Microbiomes. *ISME Journal*, 17(10), 1589–1600. <https://doi.org/10.1038/S41396-023-01470-5>
- BMKG. (2024). Indonesia Climate Policy Outlook 2024. Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika. FPCI Climate Unit.
- Fan, K., Delgado-Baquerizo, M., Guo, X., Wang, D., Zhu, Y. G., & Chu, H. (2021). Biodiversity of Keystone phylotypes Determines Crop Production in a 4-Decade Fertilization Experiment. *ISME Journal*, 15, 550–561. <https://doi.org/10.1038/s41396-020-00796-8>
- Fu, X., Huang, Y., Fu, Q., Qiu, Y., Zhao, J., Li, J., Wu, X., Yang, Y., Liu, H., Yang, X., & Chen, H. (2023). Critical Transition of Soil Microbial Diversity and Composition Triggered by Plant Rhizosphere Effects. *Frontiers In Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/Fpls.2023.1252821>
- G20 Climate Risk Atlas. (2021). Climate Change in Indonesia: Impacts and Adaptation Strategies. G20 Climate Risk Atlas Report.
- Global Climate Risks. (2025). Economic Impact Assessment of Climate Change on Indonesian Agriculture Sector 2024–2050. Jakarta: Ministry of Finance Indonesia.
- Harefa, S. P., & Lase, R. A. (2024). Application of Indigenous PGPR to Enhance Rice Drought Tolerance Through Osmoprotectant and Exopolysaccharide Production. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 15(2), 112–125.
- Knight, C. G., Nicolitch, O., Griffiths, R. I., Goodall, T., Jones, B., Weser, C., Langridge, H., Davison, J., Dellavalle, A., Eisenhauer, N., Gongalsky, K. B., Hector, A., Jardine, E., Kardol, P., Maestre, F. T., Schädler, M., Semchenko, M., Stevens, C., Tsiafouli, M., ... De Vries, F. T. (2024). Soil Microbiomes Show Consistent and Predictable Responses to Extreme Events. *Nature*, 636(8043), 690–696. <https://doi.org/10.1038/S41586-024-08185-3>
- Liu, X., Li, Q., Li, Y., Guan, G., & Chen, S. (2022). Responses of Soil Microbial Community to Climate Change and Vegetation Type. *Science of the Total Environment*, 807, 150841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150841>
- Mengist, W., Soromessa, T., & Legese, G. (2020). Method for Conducting Systematic Literature Review and Meta-Analysis for Environmental Science Research. *MethodsX*, 7, 100777. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2020.100777>

- Naylor, R. L., Battisti, D. S., Vimont, D. J., Falcon, W. P., & Burke, M. B. (2007). Assessing Risks of Climate Variability and Climate Change for Indonesian Rice Agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(19), 7752-7757. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701825104>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *BMJ*, 372, n71. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pandey, V., Ansari, M. W., Tula, S., Yadav, S., Sahoo, R. K., Shukla, N., Bains, G., Badal, S., Chandra, S., Gaur, A. K., Kumar, A., Shukla, A., Kumar, J., & Tuteja, N. (2019). Dose-Dependent Response of *Trichoderma Harzianum* in Improving Drought Tolerance in Rice Genotypes. *Planta*, 243(5), 1251–1264. <https://doi.org/10.1007/S00425-016-2482-X>
- Rahman, N. S. N. A., Hamid, N. W. A., & Nadarajah, K. (2021). Effects Of Abiotic Stress on Soil Microbiome. In *International Journal of Molecular Sciences* (Vol. 22, Issue 16). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/Ijms22169036>
- ReliefWeb. (2024). Indonesia El Niño 2023-2024: Drought Impact Assessment. United Nations Office for the Coordination of Humanitarian Affairs.
- Sardiana, I. K. (2021). Organic Vegetable Farming System Enhancing Soil Carbon Sequestration in Bali, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 724(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/724/1/012025>
- Schneider, D., Engelhaupt, M., Allen, K., et al. (2021). Impact of Lowland Rainforest Transformation on Diversity and Composition of Soil Prokaryotic Communities in Sumatra (Indonesia). *Frontiers in Microbiology*, 12, 626717. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.626717>
- Simarmata, T., Hibatullah, F. H., Khumairah, F. H., Irwandhi, Ambarita, D. D. M., Nurbaity, A., Herdiyantoro, D., & Kamaluddin, N. N. (2025). Advancing Climate-Resilient Rhizomicrobiome Engineering for Enhancing Productivity and Sustainability of Strategic Crop Farming in Indonesia's Problematic Soils. In *Environmental and Sustainability Indicators* (Vol. 27). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/J.Indic.2025.100821>
- Singh, D. P., Singh, V., Gupta, V. K., Shukla, R., Prabha, R., Sarma, B. K., & Patel, J. S. (2021). Microbial Inoculation in Rice Regulates Antioxidative Reactions and Defense Related Genes to Mitigate Drought Stress. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-020-61140-W>
- Tripathi, B. M., Kim, M., Lai-Hoe, A., et al. (2013). pH Dominates Variation in Tropical Soil Archaeal Diversity and Community Structure. *FEMS Microbiology Ecology*, 86, 303-311. <https://doi.org/10.1111/1574-6941.12163>
- World Bank. (2021). *CLIMATE SMART AGRICULTURE IN INDONESIA*. <https://documents1.Worlbank.org/Curated/En/752291622632903770/Pdf/Climate-Smart-Agriculture-In-Indonesia.Pdf>
- Xun, W., Li, W., Xiong, W., et al. (2024). Diversity-Triggered Deterministic Bacterial Assembly Constrains Community Functions. *Nature Communications*, 10, 3833. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-11787-5>