



Potensi Biochar sebagai Media Pembawa Bakteri Halotoleran untuk Meningkatkan Kesuburan Tanah Salin: Review Literatur

The Potential of Biochar as a Carrier Medium for Halotolerant Bacteria to Improve Saline Soil Fertility: A Literature Review

Dora Silvia Dewi¹, Ida Zulfida², Isna Windani³

^{1,2}Fakultas Pertanian, Universitas Pembinaan Masyarakat Indonesia, Medan, Indonesia.

³Fakultas Pertanian, Universitas Muhammadiyah Purworejo, Purworejo, Indonesia.

email penulis : dorasilvia151@gmail.com, idazulfida@gmail.com, isnawindani@gmail.com

Korespondensi author: dorasilvia151@gmail.com

ABSTRACT

Article History:

Accepted : 25-4-2026

Online : 25-4-2026

Keyword:

Iochar;
Saline soil;
Microbes;
Fertility;
Soil



Salinisasi tanah merupakan salah satu faktor pembatas utama dalam produksi pertanian karena dapat menurunkan kualitas fisik, kimia, dan biologis tanah serta menghambat pertumbuhan tanaman. Artikel ini bertujuan mengkaji potensi biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran dalam meningkatkan kesuburan tanah salin melalui pendekatan review literatur naratif. Kajian dilakukan dengan menelaah berbagai publikasi ilmiah terkait karakteristik tanah salin, mekanisme kerja bakteri halotoleran, sifat biochar sebagai amelioran dan carrier mikroba, serta sinergi keduanya dalam sistem tanah dan tanaman. Hasil kajian menunjukkan bahwa bakteri halotoleran berperan dalam meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman salinitas melalui produksi fitohormon, eksopolisakarida, ACC deaminase, osmoprotektan, pelarutan fosfat, mobilisasi hara, dan perbaikan homeostasis ion. Di sisi lain, biochar memiliki karakteristik porositas tinggi, luas permukaan besar, kemampuan menahan air, kapasitas tukar kation, serta gugus fungsional permukaan yang mendukung viabilitas, adhesi, pembentukan biofilm, dan kolonisasi mikroba. Kombinasi biochar dan bakteri halotoleran berpotensi memberikan efek sinergis dalam memperbaiki struktur tanah, meningkatkan retensi air dan hara, menekan dampak sodisitas, memperkuat aktivitas biologis tanah, serta meningkatkan pertumbuhan tanaman pada kondisi salin. Namun, efektivitas teknologi ini sangat dipengaruhi oleh jenis bahan baku biochar, suhu pirolisis, ukuran partikel, kompatibilitas strain bakteri, metode formulasi, dan kondisi lingkungan aplikasi. Kajian ini menyimpulkan bahwa biochar sebagai carrier bakteri halotoleran merupakan pendekatan prospektif untuk rehabilitasi tanah salin secara berkelanjutan, terutama pada lahan marginal

dan wilayah pesisir. Penelitian lanjutan diperlukan untuk standardisasi formulasi, uji lapang multimusim, serta evaluasi kelayakan teknis dan ekonomi pada skala petani.

Soil salinization is one of the major limiting factors in agricultural production because it deteriorates the physical, chemical, and biological properties of soil and inhibits plant growth. This article aims to review the potential of biochar as a carrier medium for halotolerant bacteria to improve the fertility of saline soils through a narrative literature review approach. The review examines scientific publications related to the characteristics of saline soils, the mechanisms of halotolerant bacteria, the properties of biochar as a soil ameliorant and microbial carrier, and the synergistic interaction between biochar and bacteria in the soil-plant system. The findings indicate that halotolerant bacteria enhance plant tolerance to salinity stress through the production of phytohormones, exopolysaccharides, ACC deaminase, osmoprotectants, phosphate solubilization, nutrient mobilization, and ionic homeostasis regulation. Meanwhile, biochar has high porosity, large surface area, water-holding capacity, cation exchange capacity, and surface functional groups that support microbial viability, adhesion, biofilm formation, and colonization. The combination of biochar and halotolerant bacteria has the potential to generate synergistic effects by improving soil structure, increasing water and nutrient retention, reducing sodicity impacts, strengthening soil biological activity, and enhancing plant growth under saline conditions. However, the effectiveness of this technology is strongly influenced by biochar feedstock, pyrolysis temperature, particle size, bacterial strain compatibility, formulation method, and environmental conditions during application. This review concludes that biochar as a carrier for halotolerant bacteria is a promising approach for sustainable saline soil rehabilitation, particularly in marginal lands and coastal areas. Further research is needed to standardize formulations, conduct multi-season field trials, and evaluate technical and economic feasibility at the farmer scale.

A. PENDAHULUAN

Salinisasi tanah merupakan ancaman serius bagi keberlanjutan produksi pangan global. Tanah salin dan sodik terbentuk akibat akumulasi garam terlarut atau natrium dapat ditukar dalam jumlah tinggi yang mengganggu fungsi fisik, kimia, dan biologis tanah [1]. Menurut FAO, lebih dari 1,381 miliar hektare lahan dunia telah terdampak garam, setara sekitar 10,7% daratan global, dan risikonya terus meningkat akibat perubahan iklim, intrusi air laut, penggunaan air irigasi berkualitas rendah, serta buruknya sistem drainase [2]. Kondisi ini tidak hanya menurunkan produktivitas lahan, tetapi juga mengancam stabilitas sistem pertanian, terutama di wilayah kering, semi-kering, pesisir, dan lahan irigasi intensif.

Dampak salinitas terhadap tanah dan tanaman bersifat kompleks. Pada tingkat tanah, akumulasi garam menyebabkan meningkatnya tekanan osmotik, ketidakseimbangan ion, dispersi agregat, serta penurunan porositas dan kapasitas infiltrasi [3], [4]. Pada tingkat tanaman, cekaman salinitas menghambat perkecambahan, pertumbuhan akar, efisiensi fotosintesis, serta penyerapan unsur hara esensial seperti nitrogen, fosfor, kalium, kalsium, dan magnesium [5]. Dalam jangka panjang, kondisi ini mempercepat degradasi lahan dan menurunkan efisiensi input pertanian. Oleh karena itu, salinisasi tidak lagi dipandang sekadar sebagai

persoalan kimia tanah, melainkan sebagai masalah multidimensi yang memerlukan pendekatan rehabilitasi yang terpadu.

Pada tanah salin, penurunan kesuburan tidak hanya berkaitan dengan tingginya konduktivitas listrik, tetapi juga dengan rusaknya struktur tanah, rendahnya infiltrasi, terbatasnya aktivitas akar, dan menurunnya keragaman mikroba tanah [6], [7], [8]. Salinitas juga dapat mengubah komposisi komunitas mikroba rhizosfer, sehingga fungsi-fungsi ekologis penting seperti dekomposisi bahan organik, siklus hara, dan pembentukan struktur tanah menjadi terganggu. Akibatnya, upaya perbaikan tanah salin tidak cukup hanya melalui pencucian garam atau pemberian amelioran kimia, tetapi juga perlu diarahkan pada pemulihan komponen biologis tanah [9], [10]. Dalam konteks ini, bakteri halotoleran dan biochar muncul sebagai dua agen penting dalam strategi pertanian berkelanjutan [11], [12].

Bakteri halotoleran, khususnya kelompok *halotolerant plant growth-promoting rhizobacteria* (HT-PGPR), memiliki kemampuan beradaptasi pada lingkungan dengan tekanan osmotik tinggi dan tetap menjalankan fungsi-fungsi yang mendukung pertumbuhan tanaman. Mikroorganisme ini dapat meningkatkan toleransi tanaman terhadap cekaman garam melalui produksi fitohormon, sintesis eksopolisakarida, pelarutan fosfat, fiksasi nitrogen, produksi siderofor, serta aktivitas ACC deaminase yang membantu menurunkan stres etilen pada tanaman [13], [14]. Selain itu, beberapa bakteri halotoleran juga berkontribusi dalam memperbaiki lingkungan rhizosfer dengan meningkatkan ketersediaan hara dan menekan akumulasi ion toksik, sehingga berpotensi menjadi komponen kunci dalam sistem pertanian di lahan salin [15], [16].

Namun demikian, keberhasilan aplikasi inokulan mikroba di lapangan sering kali masih menghadapi berbagai kendala. Viabilitas mikroba setelah aplikasi dapat menurun akibat suhu tinggi, kekeringan, fluktuasi pH, radiasi, persaingan dengan mikroba indigenus, dan keterbatasan habitat mikro yang mendukung kolonisasi. Dalam banyak kasus, efektivitas inokulan yang tinggi di kondisi laboratorium tidak selalu terulang di lapang karena lemahnya kemampuan bertahan dan beradaptasi setelah diinokulasikan ke tanah [17]. Oleh sebab itu, pengembangan media pembawa (*carrier*) yang mampu melindungi sel mikroba, mempertahankan viabilitas, dan mendukung kolonisasi akar menjadi aspek yang sangat penting dalam teknologi pupuk hayati modern.

Biochar adalah material kaya karbon hasil pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen yang memiliki struktur pori, luas permukaan tinggi, stabilitas kimia, serta kapasitas adsorpsi yang baik. Karakteristik tersebut menjadikan biochar tidak hanya berfungsi sebagai amelioran tanah, tetapi juga sebagai habitat mikro bagi mikroorganisme. Banyak penelitian menunjukkan bahwa biochar dapat menjadi media pembawa mikroba yang efektif karena mampu menyediakan ruang

perlindungan dalam pori-porinya, mempertahankan kelembapan, meningkatkan adhesi sel, dan memfasilitasi pembentukan biofilm [18], [19] Dengan demikian, biochar berpotensi meningkatkan keberhasilan introduksi bakteri halotoleran ke lingkungan tanah yang tercekam.

Kombinasi biochar dan bakteri halotoleran menawarkan pendekatan sinergis dalam rehabilitasi tanah salin. Biochar berperan memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah, seperti meningkatkan agregasi, kapasitas tukar kation, retensi air, dan ketersediaan hara, sekaligus menurunkan dampak toksisitas ion tertentu. Sementara itu, bakteri halotoleran memperkuat aspek biologis tanah melalui stimulasi pertumbuhan tanaman, peningkatan aktivitas enzimatis, dan pemulihan fungsi mikrobiologis rhizosfer. Sinergi ini menjadikan sistem biochar mikroba sebagai strategi yang lebih holistik dibandingkan aplikasi tunggal masing-masing komponen. Dalam kerangka pertanian berkelanjutan, pendekatan tersebut relevan untuk mendukung produktivitas lahan marginal sekaligus memperbaiki kualitas tanah secara bertahap. Meskipun demikian, kajian mengenai biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran masih berkembang dan belum sepenuhnya terintegrasi dalam satu kerangka konseptual yang utuh. Sebagian studi lebih banyak menyoroti efek biochar sebagai pembenah tanah, sedangkan studi lain berfokus pada peran bakteri halotoleran sebagai inokulan hayati. Kajian yang secara khusus menempatkan biochar sebagai *carrier* bagi bakteri halotoleran dalam konteks peningkatan kesuburan tanah salin masih relatif terbatas, terutama yang membahas mekanisme sinergi, faktor penentu keberhasilan, serta tantangan aplikasinya di tingkat lapang. Oleh karena itu, diperlukan suatu ulasan literatur yang mampu menghimpun temuan-temuan terbaru dan menyusunnya ke dalam perspektif yang lebih aplikatif.

Berdasarkan latar belakang tersebut, artikel ini mengulas potensi biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran dalam meningkatkan kesuburan tanah salin. Ulasan ini penting karena mengintegrasikan dua pendekatan ameliorasi biofisik tanah oleh biochar dan rekayasa biologis oleh mikroba ke dalam satu kerangka rehabilitasi lahan salin yang lebih aplikatif [18], [20]. Secara khusus, artikel ini membahas karakteristik tanah salin dan implikasinya terhadap kesuburan tanah, peran dan mekanisme kerja bakteri halotoleran, sifat-sifat biochar yang mendukung fungsinya sebagai media pembawa, serta prospek sinergi keduanya dalam pengelolaan lahan salin. Dengan demikian, review ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan teknologi bioinokulan berbasis biochar yang lebih efektif, stabil, dan adaptif terhadap kondisi lahan salin.

B. MATERI DAN METODE

Artikel ini menggunakan metode review literatur naratif yang diperkuat dengan tahapan penelusuran dan seleksi pustaka secara sistematis. Pendekatan ini

digunakan untuk menghimpun, membandingkan, dan mensintesis berbagai temuan ilmiah mengenai potensi biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran dalam meningkatkan kesuburan tanah salin. Fokus kajian mencakup karakteristik tanah salin, peran bakteri halotoleran dalam mengurangi cekaman salinitas, fungsi biochar sebagai carrier mikroba, serta perkembangan riset biochar–mikroba untuk rehabilitasi lahan terdampak garam.

Penelusuran literatur dilakukan melalui basis data ilmiah seperti Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, PubMed/PMC, dan Google Scholar, serta sumber otoritatif seperti FAO. Kata kunci yang digunakan meliputi *biochar*, *halotolerant bacteria*, *plant growth-promoting rhizobacteria*, *saline soil*, *microbial carrier*, *biochar carrier*, dan *soil fertility*, dengan bantuan operator Boolean AND, OR, dan NOT.

Literatur yang digunakan dipilih berdasarkan kriteria tertentu, yaitu artikel ilmiah terutama dalam 10 tahun terakhir, dengan prioritas 5 tahun terakhir; artikel review, meta-analisis, maupun penelitian eksperimental yang relevan; serta sumber yang membahas mekanisme biologis, sifat fisikokimia biochar, viabilitas mikroba, kolonisasi akar, perubahan sifat tanah, dan respons tanaman pada kondisi salin. Artikel yang tidak relevan, duplikat, non-ilmiah, atau tidak menjelaskan metode penelitian secara memadai dikeluarkan dari kajian.

Seleksi pustaka dilakukan bertahap, mulai dari peninjauan judul dan abstrak hingga telaah teks penuh. Literatur terpilih kemudian dikelompokkan ke dalam tema utama, yaitu degradasi kesuburan tanah salin, mekanisme bakteri halotoleran, karakteristik biochar sebagai amelioran dan carrier, efek sinergis biochar–mikroba, serta tantangan dan prospek aplikasinya di lapangan.

Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif melalui sintesis naratif. Setiap sumber dibandingkan berdasarkan objek penelitian, jenis biochar, strain mikroba, kondisi salinitas, parameter tanah, dan respons tanaman. Pendekatan ini digunakan untuk menemukan pola umum, memperkuat temuan yang konsisten, menjelaskan perbedaan hasil antarpelitian, serta mengidentifikasi kesenjangan riset, terutama terkait standarisasi biochar sebagai carrier, kestabilan inokulan bakteri halotoleran, dan keterbatasan uji lapang jangka panjang.

C. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Karakteristik tanah salin dan implikasinya terhadap kesuburan tanah

Tanah salin dicirikan oleh tingginya konsentrasi garam terlarut yang menyebabkan stres osmotik pada tanaman, sehingga akar sulit menyerap air meskipun tanah tampak lembap. Pada banyak kasus, salinitas juga disertai akumulasi ion toksik seperti Na^+ dan Cl^- yang mengganggu keseimbangan ionik, menekan penyerapan K^+ , Ca^{2+} , dan unsur hara penting lainnya. Selain itu, pada tanah salin-sodik, dominasi

natrium dapat merusak agregat tanah, menurunkan porositas efektif, memperburuk aerasi, dan meningkatkan kepadatan tanah. Kombinasi faktor-faktor tersebut menjadikan tanah salin memiliki kualitas fisik, kimia, dan biologis yang rendah.

Dari sisi biologis, cekaman salinitas menurunkan biomassa mikroba, mengubah komposisi komunitas rizosfer, serta menekan enzim tanah yang penting untuk siklus hara. Padahal, komponen biologis sangat menentukan mineralisasi bahan organik, fiksasi nitrogen, pelarutan fosfat, dan stabilitas agregat. Karena itu, pemulihan tanah salin idealnya tidak hanya menurunkan kadar garam atau natrium dapat ditukar, tetapi juga menghidupkan kembali fungsi biologis tanah [11], [21].

2. Peran bakteri halotoleran dalam sistem tanah tanaman pada kondisi salin

Bakteri halotoleran adalah bakteri yang tetap dapat tumbuh dan berfungsi pada kondisi kadar garam tinggi. Dalam konteks pertanian, kelompok ini banyak dikaji sebagai HT-PGPR karena mampu meningkatkan toleransi tanaman terhadap salinitas sekaligus memperbaiki kualitas tanah. Mekanisme kerjanya meliputi produksi ACC deaminase untuk menurunkan etilen stres, sintesis fitohormon seperti IAA, produksi eksopolisakarida (EPS), pembentukan osmoprotektan, peningkatan antioksidan, serta perbaikan homeostasis ion dalam tanaman [22], [23], [24].

EPS yang dihasilkan bakteri halotoleran sangat penting pada tanah salin karena dapat membantu pembentukan agregat tanah, meningkatkan retensi air mikro, dan mengurangi efek merusak ion natrium pada lingkungan perakaran. Selain itu, sejumlah bakteri halotoleran diketahui mampu melarutkan fosfat, memobilisasi kalium, dan berkontribusi pada siklus nitrogen, sehingga perannya tidak terbatas pada peningkatan ketahanan tanaman, tetapi juga pada peningkatan kesuburan tanah. Ulasan terbaru di *FEMS Microbiology Ecology* menegaskan bahwa HT-PGPR merupakan alat biologis yang makin menjanjikan untuk remediasi tanah salin dan peningkatan pertumbuhan tanaman di bawah cekaman garam [25]. Meski prospektif, aplikasi bakteri halotoleran di lapang sering terkendala rendahnya *survival* setelah formulasi dan aplikasi. Mikroba yang diinokulasikan dapat kehilangan viabilitas selama penyimpanan, terpapar fluktuasi suhu dan kelembapan, atau gagal berkolonisasi secara stabil di rizosfer. Oleh sebab itu, keberhasilan inokulan tidak hanya bergantung pada kualitas strain, tetapi juga pada kualitas media pembawanya [18].

3. Biochar sebagai amelioran tanah salin

Biochar adalah bahan kaya karbon yang dihasilkan dari pirolisis biomassa pada kondisi terbatas oksigen. Sebagai amelioran tanah, biochar dikenal mampu meningkatkan porositas, agregasi, retensi air, kapasitas tukar kation (KTK), serta

kandungan karbon organik tanah. Dalam tanah salin, biochar juga banyak dilaporkan dapat memperbaiki struktur tanah dan membantu menurunkan indikator sodisitas seperti *sodium adsorption ratio* (SAR) dan *exchangeable sodium percentage* (ESP), walaupun besarnya efek dipengaruhi oleh bahan baku, suhu pirolisis, dosis, dan karakteristik awal tanah [12], [26], [27].

Meta-analisis terbaru menunjukkan bahwa aplikasi biochar pada tanah salin dapat meningkatkan KTK secara nyata serta menurunkan SAR dan ESP, dua parameter yang berkaitan erat dengan kerusakan struktur dan rendahnya kesuburan tanah sodik. Selain itu, biochar juga diketahui memengaruhi komunitas mikroba tanah dan memperbaiki proses siklus hara. Artinya, biochar bukan hanya pembenah fisik-kimia, melainkan juga penggerak pemulihan biologis tanah [11], [21], [27].

Untuk memperjelas kontribusi masing-masing komponen, Tabel 1 menyajikan perbandingan biochar, bakteri halotoleran, dan kombinasi keduanya dalam memperbaiki tanah salin.

Tabel 1. Komparasi peran biochar, bakteri halotoleran, dan kombinasinya dalam perbaikan tanah salin

| Aspek | Biochar | Bakteri halotoleran | Kombinasi biochar + bakteri halotoleran | Sitasi |
|-------------------------------------|---|---|---|------------|
| Fungsi utama | Amelioran fisik-kimia tanah salin | Agen hayati pemacu pertumbuhan dan toleransi salinitas | Sistem ameliorasi terpadu fisik, kimia, dan biologis | [18] |
| Mekanisme dominan | Meningkatkan porositas, agregasi, retensi air, kapasitas tukar kation, dan karbon organik tanah | Menghasilkan ACC deaminase, IAA, EPS, osmoprotektan, serta membantu homeostasis ion | Biochar menyediakan mikrohabitat; bakteri memanfaatkan habitat itu untuk kolonisasi dan aktivitas yang lebih stabil | [28] |
| Pengaruh terhadap sifat fisik tanah | Memperbaiki struktur, aerasi, agregasi, dan kapasitas menahan air | EPS dapat membantu pembentukan agregat, tetapi efek fisik langsung lebih terbatas | Perbaikan struktur lebih kuat karena efek amelioratif biochar diperkuat aktivitas biologis bakteri | [18], [29] |
| Pengaruh terhadap sifat kimia tanah | Dapat membantu memperbaiki KTK, pH, serta menurunkan dampak sodisitas pada kondisi tertentu | Membantu pelarutan fosfat, mobilisasi kalium, dan meningkatkan efisiensi serapan hara | Perbaikan ketersediaan hara lebih komprehensif karena ada efek pembawa dan efek biologis | [18], [29] |
| Pengaruh terhadap | Menyediakan habitat bagi | Meningkatkan aktivitas | Meningkatkan viabilitas, persistensi, | [28], [29] |

| | | | | |
|----------------------|---|---|--|------------|
| sifat biologis tanah | mikroba dan mendukung aktivitas komunitas tanah | mikrobiologis, kolonisasi akar, dan fungsi rizosfer | kolonisasi, dan stabilitas komunitas mikroba rizosfer | |
| Kelebihan utama | Stabil, berbasis biomassa, dan dapat berfungsi sebagai pembenah tanah | Adaptif pada kadar garam tinggi dan langsung menekan dampak stres salinitas | Efek sinergis lebih besar daripada aplikasi tunggal pada banyak kajian | [18], [30] |
| sekaligus carrier | | | | |

4. Biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran

Sejumlah kajian mutakhir menegaskan bahwa biochar memiliki potensi besar sebagai media pembawa mikroba. Keunggulan utama biochar terletak pada porositas tinggi, luas permukaan besar, kemampuan menahan air, ketersediaan karbon, serta keberadaan gugus fungsional permukaan yang mendukung adhesi sel, proliferasi mikroba, dan pembentukan biofilm. Review di *Science of the Total Environment* menyimpulkan bahwa penggunaan biochar sebagai *carrier* dapat meningkatkan persistensi, kelangsungan hidup, dan kolonisasi mikroba baik di tanah maupun di perakaran tanaman [18]

Review lain menekankan bahwa biochar yang dirancang secara tepat dapat menjadi pembawa yang sangat baik untuk mikroorganisme menguntungkan. Sifat fisik-kimia seperti pH yang sesuai, ukuran pori yang kompatibel dengan ukuran sel, serta gugus fungsi permukaan menentukan keberhasilan imobilisasi dan kelangsungan hidup inokulan. Dengan kata lain, desain biochar tidak boleh hanya mempertimbangkan kapasitas adsorpsi atau kandungan karbon, tetapi juga kompatibilitasnya dengan mikroba target [28]

. Untuk memperkuat pembahasan empiris, Tabel 2 merangkum kecenderungan hasil-hasil penelitian mengenai biochar, bakteri halotoleran, dan interaksi keduanya pada tanah salin.

Tabel 2 memperlihatkan bahwa arah hasil penelitian umumnya konsisten, yaitu kombinasi biochar dan bakteri halotoleran cenderung memberikan hasil lebih baik daripada aplikasi tunggal. Meski demikian, keterbatasan bukti lapang jangka panjang masih menjadi celah utama yang perlu diisi oleh penelitian berikutnya. Dalam konteks bakteri halotoleran, fungsi biochar sebagai *carrier* menjadi sangat strategis. Mikroba pada lingkungan salin menghadapi tekanan osmotik yang tinggi, sehingga perlindungan mikrohabitat dari pori-pori biochar dapat membantu mempertahankan kelembapan mikro, mengurangi stres lingkungan, dan memperbesar peluang kolonisasi akar. Studi terbaru menunjukkan bahwa biochar lumut (*moss biochar*) mampu mengikat *Halomonas salifodinae* secara kuat dan menginduksi pembentukan biofilm pada permukaan biochar, yang pada akhirnya memperkuat kolonisasi akar pada lingkungan saline-alkali [35].

Tabel 2. Komparasi hasil kajian empiris terkait biochar sebagai carrier bakteri halotoleran pada tanah salin

| Fokus kajian | Kondisi/ objek | Temuan utama | Implikasi | Sitasi |
|--|---|--|---|---------------|
| Biochar sebagai amelioran tanah salin | Tanah salin/saline-alkali | Biochar dapat meningkatkan porositas, retensi air, KTK, dan mendukung perbaikan beberapa indikator sodisitas tergantung jenisnya | Biochar layak dijadikan basis pembenah tanah sekaligus carrier mikroba | [18], [28] |
| Bakteri halotoleran sebagai agen hayati | Rizosphere dan tanaman di bawah cekaman garam | HT-PGPR membantu toleransi garam melalui ACC deaminase, fitohormon, EPS, osmoprotektan, dan pengaturan ion | Potensial untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman dan fungsi biologis tanah | [28], [32] |
| Biochar sebagai carrier mikroba | Sistem biochar-mikroba | Sifat pori, luas permukaan, kelembapan, dan gugus fungsional biochar mendukung adhesi sel, biofilm, dan kelangsungan hidup mikroba | Meningkatkan keberhasilan formulasi inokulan dibanding aplikasi mikroba tanpa carrier | [18], [33] |
| Biochar terinokulasi mikroba | Sistem tanah bermasalah | Biochar terinokulasi mikroba dapat memperbaiki sifat fisikokimia dan biokimia tanah | Menunjukkan bahwa carrier aktif memberi manfaat lebih luas dibanding biochar pasif | [28], [33] |
| Kombinasi biochar dan strain toleran garam | Tanah terdampak garam | Kombinasi biochar dan strain toleran garam berpotensi memperbaiki kesehatan tanah dan pertumbuhan tanaman | Mendukung penggunaan formulasi gabungan pada tanah salin | [29] |
| Faktor desain carrier | Faktor desain carrier | Faktor desain carrier | Faktor desain carrier | [28], [34] |
| Keterbatasan riset saat ini | Mayoritas studi pot, | Bukti lapang jangka panjang dan | Perlu uji multimusim dan | [18], [29] |

| | | |
|---------------------------|--|--|
| rumah kaca, dan review | standardisasi kompatibilitas biochar–strain masih <u>terbatas</u> | validasi pada agroekosistem tropis |
|---------------------------|--|--|

5. Mekanisme sinergi biochar–bakteri halotoleran dalam meningkatkan kesuburan tanah salin

Sinergi biochar dan bakteri halotoleran dapat dijelaskan melalui beberapa jalur. Pertama, biochar memperbaiki habitat mikroba dengan menyediakan ruang pori, kelembapan, dan perlindungan fisik, sehingga viabilitas inokulan lebih terjaga. Kedua, biochar memperbaiki lingkungan tanah melalui peningkatan KTK, penyanggaan pH, peningkatan agregasi, dan pengurangan dampak sodisitas, sehingga kondisi menjadi lebih kondusif bagi aktivitas mikroba dan pertumbuhan akar. Ketiga, bakteri halotoleran memanfaatkan habitat tersebut untuk menjalankan fungsi biologisnya secara lebih stabil, misalnya menghasilkan EPS, ACC deaminase, dan fitohormon [18], [27]

Dari sudut kesuburan tanah, sinergi ini berpotensi meningkatkan ketersediaan unsur hara secara langsung maupun tidak langsung. Biochar dapat menyerap dan melepaskan nutrisi secara bertahap serta menurunkan kehilangan hara melalui pencucian, sedangkan bakteri membantu mineralisasi, pelarutan fosfat, dan mobilisasi unsur tertentu. Pada saat yang sama, perbaikan struktur tanah dan aktivitas biologis akan memperbesar efisiensi serapan hara oleh tanaman [18], [20], [21]. Untuk memperjelas alur interaksi antara biochar dan bakteri halotoleran, Tabel berikut merangkum komponen utama mekanisme sinergi keduanya dalam meningkatkan kesuburan tanah salin. Secara umum, biochar berperan sebagai

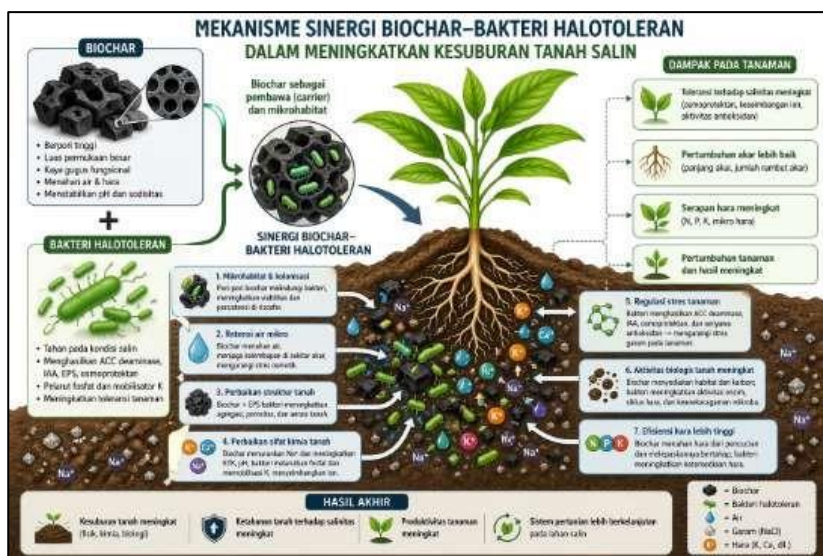
Berdasarkan tabel tersebut, sinergi biochar–bakteri halotoleran bekerja melalui tiga jalur besar. Pertama, biochar memperbaiki lingkungan fisik-kimia tanah, termasuk porositas, retensi air, dan beberapa indikator sodisitas. Kedua, bakteri halotoleran memperkuat ketahanan tanaman melalui ACC deaminase, EPS, osmoprotektan, fitohormon, dan perbaikan homeostasis ion. Ketiga, ketika biochar digunakan sebagai *carrier*, kelangsungan hidup dan kolonisasi bakteri menjadi lebih baik, sehingga efek biologisnya lebih stabil di rizosfer. Hasilnya adalah perbaikan kesuburan tanah yang lebih komprehensif dibandingkan aplikasi tunggal. Mekanisme Sinergi Biochar-Bakteri Halotoleran dalam Meningkatkan Kesuburan Tanah Salin disajikan di Gambar 1.

pembenah habitat dan media pembawa, sedangkan bakteri halotoleran menjalankan fungsi biologis yang secara langsung membantu tanah dan tanaman menghadapi cekaman garam.

Tabel 3. Mekanisme sinergi biochar–bakteri halotoleran dalam meningkatkan kesuburan tanah salin

| Komponen mekanisme | Peran biochar | Peran bakteri halotoleran | Efek sinergis terhadap tanah/tanaman | Sitasi |
|------------------------------------|---|---|--|---------------|
| Penyediaan mikrohabitat | Biochar menyediakan pori, luas permukaan, dan ruang perlindungan bagi mikroba | Bakteri memanfaatkan pori biochar sebagai tempat kolonisasi dan bertahan hidup | Meningkatkan viabilitas, persistensi, dan kolonisasi inokulan di rizosfer | [36], [37] |
| Retensi air mikro | Biochar meningkatkan kapasitas menahan air dan menjaga kelembapan mikro di sekitar akar | Bakteri halotoleran tetap aktif pada kondisi osmotik tinggi dan memanfaatkan kelembapan mikro untuk metabolisme | Menurunkan dampak stres osmotik pada akar dan mendukung aktivitas mikroba di tanah salin | [38], [39] |
| Perbaikan struktur tanah | Biochar meningkatkan agregasi, porositas, dan aerasi tanah | Bakteri menghasilkan eksopolisakarida (EPS) yang membantu pembentukan agregat | Struktur tanah menjadi lebih stabil sehingga perakaran dan aktivitas mikroba meningkat | [40], [41] |
| Perbaikan sifat kimia tanah | Biochar dapat meningkatkan kapasitas tukar kation, memperbaiki pH, dan membantu menurunkan dampak sodisitas | Bakteri membantu pelarutan fosfat, mobilisasi kalium, dan keseimbangan ion | Ketersediaan hara meningkat dan gangguan akibat Na^+ menjadi lebih rendah | [42], [43] |
| Adhesi sel dan pembentukan biofilm | Gugus fungsional permukaan biochar mendukung adhesi sel dan pembentukan biofilm | Bakteri membentuk biofilm yang memperkuat kolonisasi dan ketahanan terhadap cekaman | Inokulan lebih stabil selama penyimpanan maupun setelah aplikasi ke tanah | [44], [45] |

| | | | | |
|--|--|---|--|------------|
| Regulasi stres tanaman | Biochar memperbaiki lingkungan perakaran dan mengurangi tekanan lingkungan secara tidak langsung | Bakteri menghasilkan ACC deaminase, IAA, osmoprotektan, dan senyawa antioksidan | Tanaman lebih toleran terhadap salinitas, pertumbuhan akar membaik, dan serapan hara meningkat | [46], [47] |
| Aktivitas biologis tanah | Biochar mendukung habitat dan sumber karbon bagi komunitas mikroba tertentu | Bakteri meningkatkan fungsi rizosfer dan proses biologis tanah | Aktivitas enzimatik, siklus hara, dan kestabilan komunitas mikroba menjadi lebih baik | [48], [49] |
| Efisiensi penggunaan hara | Biochar menahan hara dari pencucian dan melepaskannya lebih bertahap | Bakteri membantu mineralisasi dan pelarutan unsur hara tertentu | Efisiensi pemupukan meningkat dan kehilangan unsur hara berkurang | [50], [51] |
| Kolonisasi akar pada tanah salin | Biochar dapat bertindak sebagai carrier yang mengantarkan mikroba lebih dekat ke zona akar | Bakteri halotoleran berkolonisasi pada akar dan memperkuat hubungan tanaman-mikroba | Respons tanaman terhadap cekaman garam menjadi lebih baik dan pertumbuhan lebih stabil | [52], [53] |
| Perbaikan kualitas tanah secara menyeluruh | Biochar memperbaiki komponen fisik dan sebagian komponen kimia tanah | Bakteri memperbaiki komponen biologis dan fisiologi tanaman | Kombinasi keduanya lebih efektif daripada aplikasi tunggal dalam memperbaiki tanah saline-alkali | [19], [42] |



Gambar 1. Mekanisme Sinaergi Biochar-Bakteri Halotoleran dalam Meningkatkan Kesuburan Tanah Salin

6. Bukti empiris penggunaan biochar dan bakteri halotoleran pada tanah salin

Sejumlah studi empiris mendukung sinergi tersebut. Penelitian terbaru pada tanah saline-alkali pesisir melaporkan bahwa komposit biochar termodifikasi yang dimuati PGPR halotoleran mampu meningkatkan pertumbuhan gandum sekaligus memperbaiki kualitas tanah, menunjukkan bahwa penggabungan biochar dan mikroba dapat menghasilkan efek yang lebih kuat dibanding aplikasi terpisah [54].

Penelitian lain menunjukkan bahwa aplikasi simultan biochar dan bakteri pada kondisi salin dapat memperbaiki sifat fisikokimia tanah dan meningkatkan stabilitas humus. Selain itu, studi pada sistem tanaman pakan juga memperlihatkan bahwa biochar tertentu mampu memperkuat kolonisasi bakteri halotoleran pada akar, suatu faktor penting bagi keberhasilan inokulan dalam jangka menengah. Studi kombinasi biochar-mikroba pada berbagai tanaman di tanah salin atau saline-alkali juga konsisten menunjukkan arah perbaikan pada pertumbuhan tanaman, kualitas tanah, dan struktur komunitas mikroba [20], [21], [55].

Walaupun hasilnya menjanjikan, sebagian besar penelitian masih dilakukan pada skala rumah kaca, pot, atau inkubasi laboratorium. Data lapangan multimusim, terutama pada tanah salin tropis dan pada sistem budidaya petani, masih terbatas.

Selain itu, jenis biochar yang digunakan sangat beragam, mulai dari limbah pertanian, kayu, hingga bahan lumut, sehingga perbandingan langsung antarstudi belum selalu mudah dilakukan [18], [26].

7. Faktor-faktor yang menentukan keberhasilan formulasi biochar sebagai carrier

Keberhasilan biochar sebagai media pembawa bakteri halotoleran ditentukan oleh beberapa faktor. Pertama, asal biomassa. Biochar dari sekam, jerami, kayu, atau limbah hijau dapat menghasilkan sifat berbeda pada pori, pH, kandungan abu, dan stabilitas karbon. Kedua, suhu pirolisis. Suhu yang terlalu tinggi dapat meningkatkan aromatisasi karbon tetapi juga mengubah gugus fungsional dan aksesibilitas pori untuk mikroba. Ketiga, ukuran partikel dan kelembapan. Partikel terlalu halus atau terlalu kasar dapat mengubah kemampuan kolonisasi dan stabilitas penyimpanan inokulan. Keempat, kompatibilitas dengan strain bakteri. Tidak semua bakteri akan menunjukkan kelangsungan hidup yang sama pada biochar tertentu [18], [28].

Selain itu, formulasi inokulan perlu mempertimbangkan umur simpan, metode sterilisasi, cara pemuatan sel, kepadatan populasi minimum, dan kondisi penyimpanan. Literatur menunjukkan bahwa penilaian kualitas *carrier* tidak cukup hanya berdasarkan luas permukaan BET atau volume pori, tetapi harus mengintegrasikan sifat fisik-kimia, respons mikroba target, dan performa setelah aplikasi ke tanah [18].

8. Implikasi praktis bagi pengelolaan tanah salin

Dari sudut aplikasi, penggunaan biochar sebagai *carrier* bakteri halotoleran berpotensi memberi manfaat ganda. Pada level tanah, strategi ini dapat memperbaiki struktur, menurunkan dampak natrium, meningkatkan kapasitas menyimpan air dan hara, serta menstimulasi komunitas mikroba yang lebih aktif. Pada level tanaman, strategi ini dapat menekan stres garam, memperkuat pertumbuhan akar, dan meningkatkan efisiensi pemupukan. Pendekatan seperti ini relevan untuk rehabilitasi lahan sawah pesisir, lahan kering teririgasi dengan salinitas meningkat, maupun lahan marginal yang terdampak intrusi air laut [27].

Bahan baku biochar dari residu pertanian seperti sekam padi, tongkol jagung, jerami, atau limbah perkebunan relatif tersedia. Dengan demikian, pengembangan biochar-*based inoculant* berbasis strain halotoleran lokal dapat menjadi inovasi yang murah, sirkular, dan sesuai dengan prinsip pertanian berkelanjutan. Ini sekaligus membuka peluang riset hilirisasi pada skala petani dan agroindustri lokal [18], [28].

9. Kesenjangan riset

Beberapa kesenjangan riset masih perlu dijawab. Pertama, belum ada standar universal untuk memilih biochar terbaik sebagai *carrier* bagi strain halotoleran tertentu. Kedua, masih terbatas studi yang mengevaluasi stabilitas inokulan selama penyimpanan dan setelah aplikasi lapang jangka panjang. Ketiga, masih diperlukan perbandingan antara biochar sebagai *carrier* tunggal dengan formulasi campuran lain, misalnya biochar yang dimodifikasi atau digabung dengan bahan perekat/organik lain. Keempat, kajian ekonomi dan kelayakan adopsi di tingkat petani masih jarang dilakukan [18], [56].

D. SIMPULAN DAN SARAN

Biochar memiliki potensi kuat sebagai media pembawa bakteri halotoleran untuk meningkatkan kesuburan tanah salin. Sifat biochar yang berpori, kaya karbon, mampu menahan air, dan memiliki gugus fungsional permukaannya menjadikannya sesuai untuk mendukung viabilitas, adhesi, pembentukan biofilm, dan kolonisasi bakteri. Sementara itu, bakteri halotoleran berkontribusi dalam mengurangi stres salinitas, memperbaiki keseimbangan ion, meningkatkan ketersediaan hara, dan memulihkan aktivitas biologis tanah. Kombinasi keduanya menunjukkan prospek besar untuk memperbaiki sifat fisik, kimia, dan biologis tanah salin secara simultan. Namun, keberhasilan pendekatan ini sangat bergantung pada kesesuaian antara jenis biochar, bahan baku, suhu pirolisis, strain bakteri, serta kondisi lingkungan tempat aplikasi. Karena itu, penelitian lanjutan perlu diarahkan pada standarisasi formulasi, uji lapang multimusim, serta evaluasi kelayakan teknis-ekonominya. Dengan pengembangan yang tepat, biochar berbasis residu pertanian sebagai *carrier* bakteri halotoleran berpotensi menjadi teknologi rehabilitasi tanah salin yang efektif dan berkelanjutan.

DAFTAR RUJUKAN

- [1] R. Mukhopadhyay, B. Sarkar, H. S. Jat, P. C. Sharma, and N. S. Bolan, "Soil salinity under climate change: Challenges for sustainable agriculture and food security," *J. Environ. Manage.*, vol. 280, p. 111736, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111736.
- [2] FAO, *Global status of salt-affected soils*. FAO, 2024. doi: 10.4060/cd3044en.
- [3] H. El-Ramady *et al.*, "Agricultural Waste and its Nano-Management: Mini Review," *Egyptian Journal of Soil Science*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2020, doi: 10.21608/ejss.2020.46807.1397.
- [4] Md. M. Rahman *et al.*, "Adaptive Mechanisms of Halophytes and Their Potential in Improving Salinity Tolerance in Plants," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 22, no. 19, p. 10733, 2021, doi: 10.3390/ijms221910733.

- [5] T. Balasubramaniam, G. Shen, N. Esmaili, and H. Zhang, "Plants' Response Mechanisms to Salinity Stress," *Plants*, vol. 12, no. 12, p. 2253, Jun. 2023, doi: 10.3390/plants12122253.
- [6] X. Li *et al.*, "High Salinity Inhibits Soil Bacterial Community Mediating Nitrogen Cycling," *Appl. Environ. Microbiol.*, vol. 87, no. 21, Oct. 2021, doi: 10.1128/AEM.01366-21.
- [7] X. Yu, Z. Jin, and H. Wang, "Effect of saline water for drip irrigation on microbial diversity and on fertility of aeolian sandy soils," *Diversity (Basel)*, vol. 13, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/d13080379.
- [8] S. Shan, Z. Wei, W. Cheng, D. Du, D. Zheng, and G. Ma, "Biofertilizer based on halotolerant microorganisms promotes the growth of rice plants and alleviates the effects of saline stress," *Front. Microbiol.*, vol. 14, Jun. 2023, doi: 10.3389/fmicb.2023.1165631.
- [9] H. Malal, M. A. Hamza, and H. Lakhtar, "The Ability of Vermicompost to Mitigate the Impacts of Salinity Stress on Soil Microbial Community: A Review," *Avicenna Journal of Environmental Health Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 55–62, Jun. 2024, doi: 10.34172/ajehe.5423.
- [10] N. S. N. A. Rahman, N. W. A. Hamid, and K. Nadarajah, "Effects of abiotic stress on soil microbiome," Aug. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/ijms22169036.
- [11] R. S. Dangana, I. O. Sanusi, M. Ben Okon, S. D. Terkimbi, G. Ayim, and O. A. Ibitoye, "Comprehensive evaluation of biochar influence on soil microbial diversity, nutrient cycling and contaminant remediation using systematic review and meta-analysis," Dec. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s43621-025-02238-x.
- [12] A. M. Zubairu *et al.*, "Overview of biochar role in remediating soil salinity stress in crops," Dec. 01, 2025, *Springer Nature*. doi: 10.1007/s43621-025-01875-6.
- [13] E. Gamalero and B. R. Glick, "Recent Advances in Bacterial Amelioration of Plant Drought and Salt Stress," *Biology (Basel)*, vol. 11, no. 3, p. 437, 2022, doi: 10.3390/biology11030437.
- [14] A. Gupta *et al.*, "Mechanistic Insights of Plant Growth Promoting Bacteria Mediated Drought and Salt Stress Tolerance in Plants for Sustainable Agriculture," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 7, p. 3741, Mar. 2022, doi: 10.3390/ijms23073741.
- [15] Y. Gao, H. Zou, B. Wang, and F. Yuan, "Progress and Applications of Plant Growth-Promoting Bacteria in Salt Tolerance of Crops," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 23, no. 13, p. 7036, 2022, doi: 10.3390/ijms23137036.
- [16] F. H. Khumairah *et al.*, "Halotolerant Plant Growth-Promoting Rhizobacteria Isolated From Saline Soil Improve Nitrogen Fixation and Alleviate Salt Stress in Rice Plants," *Front. Microbiol.*, vol. 13, Jun. 2022, doi: 10.3389/fmicb.2022.905210.

- [17] M. O’Callaghan, R. A. Ballard, and D. Wright, “Soil microbial inoculants for sustainable agriculture: Limitations and opportunities,” Jul. 01, 2022, *John Wiley and Sons Inc.* doi: 10.1111/sum.12811.
- [18] S. Bolan *et al.*, “The potential of biochar as a microbial carrier for agricultural and environmental applications,” *Science of The Total Environment*, vol. 886, p. 163968, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.163968.
- [19] Z. Zhu, Y. Zhang, W. Tao, X. Zhang, Z. Xu, and C. Xu, “The Biological Effects of Biochar on Soil’s Physical and Chemical Characteristics: A Review,” Mar. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/su17052214.
- [20] D. Jing *et al.*, “Effects of Biochar and PGPR Application on the Physicochemical Properties and Humus Components of Soil Used for Planting Fruit Mulberry Seedlings Under Salt Stress,” *Biology (Basel)*, vol. 14, no. 10, Oct. 2025, doi: 10.3390/biology14101441.
- [21] Y.-Y. Gu, H.-Y. Zhang, X.-Y. Liang, R. Fu, M. Li, and C.-J. Chen, “Impact of Biochar and Bioorganic Fertilizer on Rhizosphere Bacteria in Saline–Alkali Soil,” *Microorganisms*, vol. 10, no. 12, p. 2310, Nov. 2022, doi: 10.3390/microorganisms10122310.
- [22] N. Kumar Arora *et al.*, “Halo-tolerant plant growth promoting rhizobacteria for improving productivity and remediation of saline soils,” *J. Adv. Res.*, vol. 26, pp. 69–82, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.jare.2020.07.003.
- [23] V. Kumar *et al.*, “Antioxidant Defense and Ionic Homeostasis Govern Stage-Specific Response of Salinity Stress in Contrasting Rice Varieties,” *Plants*, vol. 13, no. 6, p. 778, 2024, doi: 10.3390/plants13060778.
- [24] Pallavi *et al.*, “Isolation and characterization of halotolerant plant growth promoting rhizobacteria from mangrove region of Sundarbans, India for enhanced crop productivity,” *Front. Plant Sci.*, vol. 14, Apr. 2023, doi: 10.3389/fpls.2023.1122347.
- [25] V. Kumar, N. Raghuvanshi, A. K. Pandey, A. Kumar, E. Thoday-Kennedy, and S. Kant, “Role of Halotolerant Plant Growth-Promoting Rhizobacteria in Mitigating Salinity Stress: Recent Advances and Possibilities,” *Agriculture*, vol. 13, no. 1, p. 168, Jan. 2023, doi: 10.3390/agriculture13010168.
- [26] Y. Qiu, Y. Wang, Y. Zhang, L. Zhou, Z. Xie, and X. Zhao, “Effects of adding different types and amounts of biochar to saline alkali soil on its salt ions and microbial community in northwest China,” *iScience*, vol. 28, no. 4, p. 112285, Apr. 2025, doi: 10.1016/j.isci.2025.112285.
- [27] T. Mao, Y. Wang, S. Ning, J. Mao, J. Sheng, and P. Jiang, “Assessment of the Effects of Biochar on the Physicochemical Properties of Saline–Alkali Soil Based on Meta-Analysis,” *Agronomy*, vol. 14, no. 10, Oct. 2024, doi: 10.3390/agronomy14102431.
- [28] A. Gryta *et al.*, “The Importance of the Targeted Design of Biochar Physicochemical Properties in Microbial Inoculation for Improved Agricultural

- Productivity—A Review,” *Agriculture*, vol. 14, no. 1, p. 37, Dec. 2023, doi: 10.3390/agriculture14010037.
- [29] H. M. M. Abbas *et al.*, “Microbial-inoculated biochar for remediation of salt and heavy metal contaminated soils,” *Science of The Total Environment*, vol. 954, p. 176104, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.176104.
- [30] G. Gao *et al.*, “The potential and prospects of modified biochar for comprehensive management of salt-affected soils and plants: A critical review,” *Science of The Total Environment*, vol. 912, p. 169618, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.169618.
- [31] A. Gryta, M. Frąç, and K. Oszust, “Genetic and Metabolic Diversity of Soil Microbiome in Response to Exogenous Organic Matter Amendments,” *Agronomy*, vol. 10, no. 4, p. 546, 2020, doi: 10.3390/agronomy10040546.
- [32] A. Goszcz *et al.*, “Bacterial osmoprotectants—a way to survive in saline conditions and potential crop allies,” *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 49, Jan. 2025, doi: 10.1093/femsre/fuaf020.
- [33] A. Saravanan, P. Swaminaathan, P. S. Kumar, P. R. Yaashikaa, R. Kamalesh, and G. Rangasamy, “A comprehensive review on immobilized microbes - biochar and their environmental remediation: Mechanism, challenges and future perspectives,” *Environ. Res.*, vol. 236, p. 116723, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.envres.2023.116723.
- [34] E. B. Dayoub, Z. Tóth, G. Soós, and A. Anda, “Chemical and Physical Properties of Selected Biochar Types and a Few Application Methods in Agriculture,” *Agronomy*, vol. 14, no. 11, p. 2540, Oct. 2024, doi: 10.3390/agronomy14112540.
- [35] W. Wang *et al.*, “Moss Biochar Facilitates Root Colonization of Halotolerant Halomonas salifodinae for Promoting Plant Growth Under Saline–Alkali Stress,” *Soil Syst.*, vol. 9, no. 3, p. 73, Jul. 2025, doi: 10.3390/soilsystems9030073.
- [36] M. Kayoumu, H. Wang, and G. Duan, “Interactions between microbial extracellular polymeric substances and biochar, and their potential applications: a review,” Dec. 01, 2025, *Springer*. doi: 10.1007/s42773-025-00452-4.
- [37] P. Thunshirn, W. W. Wenzel, and C. Pfeifer, “Pore characteristics of hydrochars and their role as a vector for soil bacteria: A critical review of engineering options,” 2022, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/10643389.2021.1974256.
- [38] H. Huang *et al.*, “Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil,” *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-86701-5.
- [39] N. Morselli, F. Ottani, M. Puglia, S. Pedrazzi, P. Tartarini, and G. Allesina, “Biochar-Aided Heat Transfer in Ground Source Heat Pumps: Effects on Water Capillary Rise and Carbon Storage Capability,” *Processes*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.3390/pr13010279.

- [40] M. Castellini *et al.*, "Evaluating the Effects of Compost, Vermicompost, and Biochar on Physical Quality of Sandy-Loam Soils," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2025, doi: 10.3390/app15063392.
- [41] M. H. Lee, E. H. Chang, C. H. Lee, J. Y. Chen, and S. H. Jien, "Effects of biochar on soil aggregation and distribution of organic carbon fractions in aggregates," *Processes*, vol. 9, no. 8, Aug. 2021, doi: 10.3390/pr9081431.
- [42] H. Singh, B. K. Northup, C. W. Rice, and P. V. V. Prasad, "Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis," Dec. 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s42773-022-00138-1.
- [43] K. K. Shwe, N. Chaopayao, and S. Yampracha, "Mitigation of soil salinity by addition of different rice straw biochar doses in salt-affected acid soil," *Environ. Res. Commun.*, vol. 6, no. 9, Sep. 2024, doi: 10.1088/2515-7620/ad79bf.
- [44] S. Mukherjee *et al.*, "Biochar-microorganism interactions for organic pollutant remediation: Challenges and perspectives," *Environmental Pollution*, vol. 308, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.envpol.2022.119609.
- [45] Z. Wang *et al.*, "Insights into the interfacial dynamics and interaction mechanisms between phosphate-solubilizing bacteria and straw-derived biochar," *Biochar*, vol. 7, no. 1, Dec. 2025, doi: 10.1007/s42773-025-00444-4.
- [46] S. Joseph *et al.*, "How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar," *GCB Bioenergy*, vol. 13, no. 11, pp. 1731–1764, Nov. 2021, doi: 10.1111/gcbb.12885.
- [47] G. Murtaza *et al.*, "Biochar-Soil-Plant interactions: A cross talk for sustainable agriculture under changing climate," 2023, *Frontiers Media S.A.* doi: 10.3389/fenvs.2023.1059449.
- [48] X. Zheng *et al.*, "The effects of biochar and its applications in the microbial remediation of contaminated soil: A review," *J. Hazard. Mater.*, vol. 438, p. 129557, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2022.129557.
- [49] Z. Dai *et al.*, "Association of biochar properties with changes in soil bacterial, fungal and fauna communities and nutrient cycling processes," Sep. 01, 2021, *Springer Science and Business Media B.V.* doi: 10.1007/s42773-021-00099-x.
- [50] Y. Jia, Z. Hu, Y. Ba, and W. Qi, "Application of biochar-coated urea controlled loss of fertilizer nitrogen and increased nitrogen use efficiency," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 8, no. 1, Dec. 2021, doi: 10.1186/s40538-020-00205-4.
- [51] B. A. Wijaya *et al.*, "Meranti (*Shorea sp.*) Biochar Application Method on the Growth of Sengon (*Falcataria moluccana*) as a Solution of Phosphorus Crisis," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2022, doi: 10.3390/en15062110.
- [52] Q. Zou *et al.*, "The synergistic interaction effect between biochar and plant growth-promoting rhizobacteria on beneficial microbial communities in soil," *Front. Plant Sci.*, vol. 15, 2024, doi: 10.3389/fpls.2024.1501400.

- [53] M. Pavlicevic *et al.*, "Engineered Nanoparticles, Natural Nanoclay and Biochar, as Carriers of Plant-Growth Promoting Bacteria," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 24, Dec. 2022, doi: 10.3390/nano12244474.
- [54] W. Wang *et al.*, "Biochar Application Alleviated Negative Plant-Soil Feedback by Modifying Soil Microbiome," *Front. Microbiol.*, vol. 11, Apr. 2020, doi: 10.3389/fmicb.2020.00799.
- [55] T. Arjumend and M. Turan, "Biochar and Halotolerant Bacteria in The Improvement of Saline-Sodic Soil Health and Wheat Growth," *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 11, no. 11, 2020, [Online]. Available: <http://www.ijser.org>
- [56] W. Wang, L. Zhou, Y. He, Z. Zhang, C. Zhu, and Y. Huang, "Synergistic promoting mechanism of modified biochar combined with functional microbial agent on saline-alkali soil improvement," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 40, p. 104639, Nov. 2025, doi: 10.1016/j.eti.2025.104639.