

MIKROBA PELARUT FOSFAT DAN POTENSINYA DALAM MENINGKATKAN PERTUMBUHAN TANAMAN

Rizki Desika Putri Pane, Eko Noviandi Ginting, dan Fandi Hidayat

Abstrak - Fosfor merupakan unsur hara makro primer yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah besar, selain nitrogen dan kalium. Mikroba pelarut fosfat (MPF) terbukti dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dan hasil pertanian dengan pendekatan yang ramah lingkungan. Oleh sebab itu, kajian ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai jenis, mekanisme, cara isolasi, serta manfaat MPF dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. Pada kajian ini dijelaskan bahwa beberapa mikroba tanah dari golongan bakteri, jamur, dan alga ditemukan dapat melarutkan fosfat. MPF melarutkan fosfor anorganik dengan beberapa cara yaitu produksi asam organik, asam anorganik, melepas proton, produksi siderofor dan eksopolisakarida. Sementara itu, pelarutan P organik terjadi melalui proses mineralisasi yang dikatalis oleh enzim.

Kata kunci: mikroorganisme, pelarut fosfat, tanaman

PENDAHULUAN

Fosfor merupakan unsur hara makro primer yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah besar, selain nitrogen dan kalium (Kalayu, 2019). Tanaman membutuhkan fosfor dalam proses pembentukan makromolekul, seperti protein, asam nukleat, membran plasma, ATP, vitamin dan beberapa senyawa sekunder. Selain itu, fosfor juga memainkan peran penting dalam perkembangan akar, penguatan batang, pembentukan bunga dan biji, produksi energi, reaksi penyimpanan, reaksi transfer, pertumbuhan akar, pembelahan dan pembesaran sel, ketahanan terhadap penyakit tanaman, transformasi gula menjadi pati, serta pengangkutan sifat genetik (Sharma et al., 2013; Satyaprakash et al., 2017)

Terlepas dari pentingnya fosfor untuk pertumbuhan dan metabolisme tanaman, unsur hara ini memiliki ketersediaan yang rendah di dalam tanah. Jumlah fosfor di tanah top soil umumnya berkisar antara 50 sampai 3000 mg kg⁻¹ tanah, tetapi hanya sedikit dari total fosfor yang dapat diserap oleh tanaman Zhu et al.,

2018). Ketersediaan yang rendah dalam tanah disebabkan oleh unsur fosfor yang mudah membentuk kompleks tidak larut (imobilisasi) dengan kation seperti aluminium dan besi di bawah kondisi tanah asam ataupun kalsium dan magnesium di bawah kondisi tanah basa (Krishnaraj & Dahale, 2014).

Penambahan pupuk kimia umumnya dilakukan untuk memenuhi kebutuhan tanaman terhadap unsur hara fosfor (Sharma et al., 2013). Hanya saja, aplikasi pupuk kimia yang berulang dan tidak bijaksana memberikan dampak negatif terhadap lingkungan yaitu dapat mengganggu keanekaragaman mikroba, sehingga menyebabkan hilangnya kesuburan tanah yang selanjutnya berdampak pada penurunan hasil tanaman (Sharma et al., 2013). Selain itu, lebih dari 75-90% fosfor dari pupuk kimia dapat menjadi tidak tersedia untuk diserap tanaman segera setelah aplikasi, karena terjadinya pengendapan oleh unsur logam (Dandessa & Bacha, 2018). Mikroba diketahui dapat menjadi salah satu solusi dalam meningkatkan fosfor tersedia bagi tanaman.

Mikroba pelarut fosfat (MPF) terbukti dapat meningkatkan ketersediaan fosfor yang dapat diserap tanaman dengan pendekatan yang ramah lingkungan (Zhu et al., 2011). Aplikasi mikroba pelarut fosfat juga dapat meningkatkan pertumbuhan dan hasil panen pada tanaman wijen, padi, jagung, kacang kedelai dan kacang polong Raj et al., 2014; Tajini et al., 2012).

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Rizki Desika Putri Pane (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan 20158, Indonesia

Email: rdputripane@gmail.com

Selain itu, penelitian oleh Istina et al., (2015) menunjukkan inokulasi bakteri pelarut fosfat dapat meningkatkan pertumbuhan pada bibit kelapa sawit. Oleh sebab itu, tulisan ini bertujuan untuk memberikan informasi mengenai jenis, mekanisme, cara isolasi, serta manfaat mikroba pelarut fosfat di bidang pertanian.

UNSUR FOSFOR DI TANAH

Fosfor dalam tanah yang dapat langsung diserap oleh tanaman (H_2PO_4 atau HPO_4^{2-}) hanya berkisar 0,1% dari total fosfor yang ada di tanah (Zhu et al., 2011). Sebagian besar fosfor dalam tanah berada dalam bentuk anorganik yang tidak larut (misalnya, $Ca_3(PO_4)_2$) dan bentuk organik yang tidak larut (misalnya, fitat dan asam nukleat) (Liu et al., 2015). Bentuk organik fosfor termasuk didalamnya sisa tumbuhan atau hewan yang mati dan mikroba tanah. Tanaman memperoleh fosfor dari tanah sebagai anion fosfat, namun anion fosfat sangat reaktif dan dapat diimobilisasi melalui pengendapan dengan kation seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{3+} dan Al^{3+} , tergantung pada sifat tanah (Sharma et al., 2011). Dalam bentuk ini, fosfor sangat tidak larut dan tidak tersedia bagi tanaman (Sharma et al., 2011).

MIKROBA PELARUT FOSFAT

Mikroba tanah yang telah ditemukan dapat melarutkan fosfat di antaranya bakteri, jamur, aktinomisetes, khamir dan alga. Strain bakteri tanah yang dilaporkan dapat melarutkan fosfat yaitu *Pseudomonas spp.*, *Agrobacterium spp.*, *Bacillus circulans*, *Azotobacter* (Kumar et al., 2014), *Bacillus*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Bradyrhizobium*, *Salmonella*, *Sinomonas*, *Thiobacillus* (Raj et al., 2014), *Burkholderia* (Istina et al., 2015), *Enterobacter*, *Erwinia*, *Kushneria* (Zhu et al., 2011), *Paenibacillus*, *Ralstonia*, dan *Rhizobium* (Tajini et al., 2012). Sementara itu, strain jamur yang ditemukan dapat melarutkan fosfat adalah golongan *Achrothcium*, *Alternaria*, *Arthrobotrys*, *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Curvularia*, *Cunninghamella*, *Chaetomium*, *Fusarium*, *Glomus*, *Helminthosporium*, *Micromonospora*, *Mortierella*, *Myrothecium*, *Oidiodendron*, *Paecilomyces*, *Populospora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Rhizopus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, *Schwanniomyces*, *Sclerotium*,

Torula dan *Trichoderma* (Sharma et al., 2013). Sekitar 20% aktinomisetes juga ditemukan dapat melarutkan fosfat yaitu genus *Micromonospora*, dan *Streptomyces*. Alga seperti cyanobacteria juga telah dilaporkan memiliki aktivitas pelarutan fosfat yang tinggi (Ingle & Padole, 2017). Selanjutnya, khamir *Yarrowia lipolyca* juga ditemukan memiliki potensi untuk melarutkan fosfat (Ingle & Padole, 2017). Mikroba pelarut fosfat (MPF) juga ditemukan pada rhizosfer tanaman kelapa sawit. Bakteri pelarut fosfat yang ditemukan pada rhizosfer tanaman kelapa sawit yaitu spesies *Burkholderia arboris*, *B. gladioli* dan *B. seminalis* dan *Novosphingobium nitrogenifigens* (Situmorang et al. 2015; Irawan et al. 2020).

Di antara seluruh populasi mikroba di tanah, 1-50 % merupakan bakteri pelarut fosfat, sedangkan hanya 0,1-0,5 % yang merupakan jamur pelarut fosfat (Chen et al., 2006). Jamur umumnya memiliki aktivitas pelarutan fosfat lebih tinggi dibanding bakteri karena jamur dapat menghasilkan lebih banyak asam seperti glukonat, sitrat, laktat, 2 -ketogluconic, oxalic dan tartarat (Sharma et al., 2013). Kombinasi aplikasi jamur dan bakteri pelarut fosfat memberikan efek yang lebih baik terhadap ketersediaan fosfor terlarut dibandingkan dengan aplikasi tunggal (Fitriatin et al., 2014).

MEKANISME PELARUTAN FOSFAT

1. Pelarutan fosfat anorganik

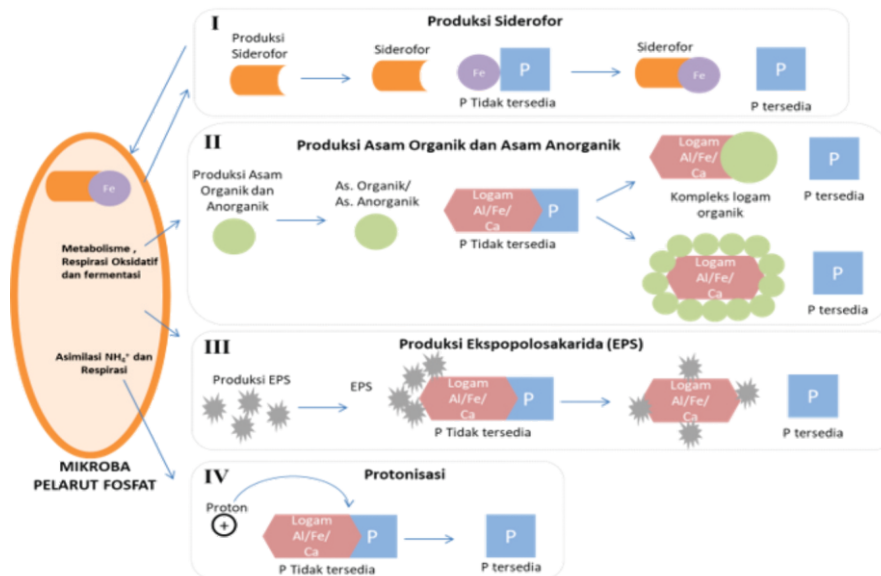
Fosfat anorganik yang terdapat di tanah meliputi Fe-P, Al-P, dan Ca-P. Mikroba Pelarut Fosfat (MPF) melarutkan fosfat anorganik dengan beberapa cara yaitu dengan produksi asam organik, produksi asam anorganik, H_2S , melepas proton dari NH_4^+ , produksi siderofor dan eksopolisakarida.

a. Produksi asam organik

MPF menghasilkan sejumlah asam organik untuk melarutkan fosfat yaitu asam asetat, sitrat, laktat, propionat, 2-Ketogluconic, asam glukonat, glikolat, oksalat, malonat, asam suksinat, fumarat, tartarat, dan lain-lain (Kishore et al., 2015) Asam 2-ketogluconic dan asam glukonat adalah asam utama yang diekskresikan oleh MPF (Krishnaraj & Dahale, 2014). Asam organik dapat melarutkan fosfat secara langsung atau mengkelat ion Fe, Al, dan Ca yang

terikat dengan fosfor (Gambar 1 bagian II). Asam organik mengkelat kation yang terikat fosfat melalui gugus hidroksil dan karboksilnya sehingga melepaskan fosfat yang terikat (Sharma et al., 2013). MPF menurunkan pH rizosfer melalui pertukaran gas (O_2/CO_2) dan menciptakan lingkungan yang asam di sekitarnya, kemudian

membebaskan fosfat dari kompleks dengan substitusi proton untuk kation seperti Fe^{+3} dan Al^{+3} , atau dengan pertukaran fosfat (PO_4^{2-}) dengan anion asam (Satyaprakash et al., 2017). Sekresi asam glukonat oleh MPF dimediasi oleh enzim glukosa dehidrogenase (quinoprotein) dalam jalur oksidasi glukosa.



Gambar 1. Mekanisme pelarutan fosfat anorganik oleh mikroba pelarut fosfat.

b. Produksi asam anorganik dan H_2S

MPF juga menghasilkan asam anorganik yang dapat melarutkan fosfat seperti asam klorida, asam sulfat, asam nitrat, dan asam karbonat (Rawat et al., 2020). Mekanisme asam organik melarutkan fosfat ditunjukkan pada Gambar 1 bagian II. Akan tetapi, asam-asam anorganik tersebut memiliki efisiensi yang lebih rendah dibandingkan dengan asam organik dalam melarutkan fosfat (Shrivastava et al., 2018). Di samping itu, H_2S juga dapat bereaksi dengan Fe-P membentuk fero sulfat dan melepaskan fosfor yang terikat. Bakteri asidofilik dan pengoksidasi sulfur menghasilkan H_2S sebagai produk sampingan metabolisme dari dekomposisi bahan organik, reduksi sulfat, dan reaksi biokimia lainnya.

c. Pelepasan proton dari NH_4^+ (asimilasi/respirasi)

MPF mengasimilasi amonium (NH_4^+) yang ada di

tanah untuk sintesis asam amino. Di dalam sel mikroba, NH_4^+ diubah menjadi amonia (NH_3) dan melepaskan proton H^+ (Gambar 1 bagian IV) (Rawat et al., 2020). Hal ini menyebabkan penurunan pH media di sekitar sel mikroba yang membantu pelarutan fosfat (Gaid, 2016).

d. Produksi Eksopolisakarida (EPS)

Eksopolisakarida (EPS) diproduksi oleh mikroba sebagai respon terhadap stres atau pada saat pembentukan biofilm. EPS yang dihasilkan oleh mikroba membentuk kompleks dengan ion logam yang ada di tanah ($Al^{3+} > Cu^{2+} > Zn^{2+} > Fe^{3+} > Mg^{2+} > K^+$), sehingga melarutkan fosfat (Gambar 1 bagian III) (Ochoa-Loza et al., 2001). Pada strain *Paenibacillus polymyxa* GOL 0202, produksi EPS terbukti terkait dengan efisiensi pelarutan fosfat (Cherchali et al., 2019)

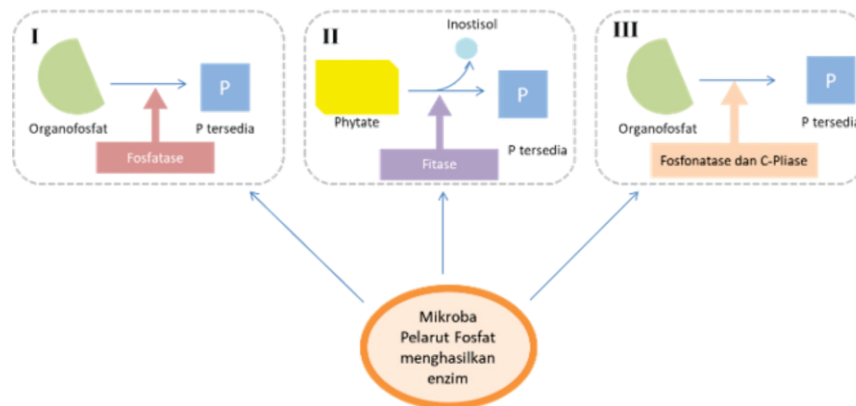
e. Produksi siderofor

Siderofor disekresi oleh mikroba sebagai akibat dari cekaman defisiensi Fe di lingkungan (Rawat et al., 2020). Mekanisme pelarutan fosfat oleh siderofor ditunjukkan pada Gambar 1 bagian I. Ferreira et al. (2019) melaporkan bahwa dalam kondisi basa, beberapa pelarut fosfat seperti *Bacillus megaterium*, *Bacillus subtilis*, *Rhizobium radiobacter*, dan *Pantoea allii* menghasilkan siderofor yang mendorong kelangsungan hidup organisme di bawah tekanan lingkungan dan juga meningkatkan kelarutan fosfor.

Skema pelarutan fosfat melalui produksi siderofor ditunjukkan oleh Gambar 1 bagian II.

2. Pelarutan fosfat organik

Fosfat organik berjumlah sekitar 20-30% dari total fosfor dalam tanah. Pelarutan fosfat organik terjadi melalui proses mineralisasi yang dikatalis oleh beberapa enzim yaitu : Fosfatase asam non-spesifik (NSAPs), Fitase, Fosfonatase dan C-Pliase (Kumar & Shastri, 2017).



Gambar 2. Mekanisme pelarutan fosfat organik oleh mikroba pelarut fosfat.

a) Fosfatase Asam Non Spesifik (NSAPs)

Mikroba pelarut fosfat (MPF) mensekresi dua jenis NSAP yaitu fosfatase asam dan basa (Kishore et al., 2015). Enzim-enzim ini dikategorikan berdasarkan pH optimum. Fosfatase asam berfungsi pada pelarutan fosfat di tanah asam dan fosfatase basa di tanah basa hingga netral (Alori et al., 2017). Fosfatase melarutkan fosfat dengan mengkatalis defosforilasi fosfoester atau ikatan fosfoanhidrida dari senyawa fosfat organik (Gambar 2 bagian I). Fosfatase basa menghidrolisis sekitar 90% dari total fosfor organik dalam tanah dan membuat fosfor menjadi tersedia bagi tanaman (Jarosch et al., 2015).

b) Fitase

Enzim fitase mengkatalis pelarutan fosfor dari senyawa fitat (fosfor organik yang melimpah di tanah),

yang merupakan sumber dominan inositol dan fosfor yang disimpan dalam biji dan serbuk sari (Gambar 2 bagian II) (Sharma et al., 2013). Inokulasi dengan bakteri penghasil fitase pada tanaman serealia menghasilkan peningkatan penyerapan fosfor tanpa menggunakan pupuk (Martínez et al., 2015).

c) Fosfonatase dan Karbon-Fosfor (C-P) Liase

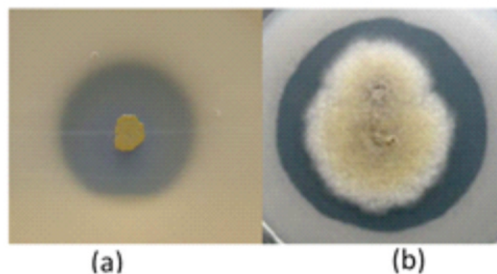
Enzim jenis ini mengkatalis pemutusan ikatan C-P organofosfat sehingga meningkatkan ketersediaan fosfor bagi tanaman (Gambar 2 bagian III) (Rodríguez et al., 2006). Aktivitas C-P liase telah ditemukan pada banyak bakteri pelarut fosfat seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Enterobacter*, *Acinetobacter*, *Rhizobium*, dan *Burkholderia* (Teng et al., 2019) dan pada jamur endofit seperti *Aspergillus*, *Penicillium*, *Piriformospora*, dan *Curvularia* (Mehta et al., 2019).

ISOLASI MIKROORGANSIME PELARUT FOSFAT

Bakteri dengan kemampuan melarutkan fosfat yang tinggi dapat diisolasi dari lingkungan yang ekstrim, misalnya tanah salin-alkali (Zhu et al., 2011). Isolasi dan pemurnian bakteri pelarut fosfat dilakukan dengan medium pikovskaya dan *National Botanical Research Institute's Phosphate* (NBRIP)

dengan $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ sebagai sumber unsur hara fosfor tidak terlarut (Atekan et al., 2014). Pengamatan kualitatif dilakukan dengan menghitung zona bening yang terbentuk di sekitar koloni (Gambar 3) yang menunjukkan terjadinya pelarutan fosfat menggunakan indeks kelarutan, dengan rumus sebagai berikut (Panhwar et al., 2012; Atekan et al., 2014).

$$\text{Efisiensi pelarutan} = \frac{\text{diameter zona bening}}{\text{diameter koloni}} \times 100 \quad (1)$$



Gambar 3. Zona bening yang dibentuk oleh (a) bakteri pelarut fosfat dan (b) jamur pelarut fosfat (Sumber: Zhu et al., 2011; Rinu et al., 2012).

Zona bening yang dibentuk koloni bakteri pada agar telah digunakan sebagai salah satu indikator untuk pelarutan fosfat oleh mikroba pelarut fosfat (MPF) (Hii et al., 2020). Namun, metode ini hanya efisien untuk mengidentifikasi MPF yang dapat melarutkan Tricalcium Phosphate (TCP), karena pelarutan kompleks Al-P atau Fe-P sering kali tidak membentuk zona bening pada medium agar (Bashan et al., 2013). Selanjutnya, ketika isolat ini diuji untuk pelarutan Al-P dan Fe-P dalam media cair, strain mikroba yang diseleksi dengan sumber fosfor berupa kompleks Al-P atau Fe-P menunjukkan aktivitas pelarutan yang lebih rendah dibanding dengan TCP, karena TCP lebih mudah larut dibandingkan dengan Al-P dan Fe-P (Bashan et al., 2013).

Kemampuan pelarutan dan mineralisasi strain bakteri dapat juga dievaluasi dengan mengukur fosfor tersedia yang dilepaskan ke dalam media kultur dengan senyawa yang tidak larut sebagai satu-satunya sumber fosfor (Guang-can et al., 2008). Tingkat fosfor terlarut atau termineralisasi sering diperkirakan dengan konsentrasi fosfor akhir dikurangi kontrol (Guang-can et al., 2008). Akan tetapi, perkiraan ini memiliki kelemahan karena tidak memperhitungkan fosfor yang digunakan

oleh sel selama pertumbuhan (Rodríguez et al., 2006).

Penelitian Panhwar et al. (2012) mengukur aktivitas bakteri dalam melarutkan fosfat dengan menghitung produksi asam organik, asam fosfatase dan aktivitas fitase. Selain itu, aktivitas pelarutan fosfat oleh MPF dapat diukur dengan pengujian asam fosfatase dengan modifikasi metode Tabatabai & Bremner (1969) dan aktivitas fitase dengan menggunakan modifikasi dari metode Fiske & Subbarow (1925).

Bashan et al. (2012) menjelaskan bahwa faktor seleksi yang umum digunakan untuk sifat pelarutan fosfat pada bakteri adalah TCP, akan tetapi TCP tidak dapat diandalkan sebagai faktor seleksi universal untuk mengisolasi dan pengujian bakteri pelarut fosfat yang meningkatkan pertumbuhan tanaman. MPF yang diisolasi dengan medium sumber P berupa TCP, efektif digunakan pada tanah yang basa atau berkapur yang didominasi oleh kalsium fosfat dan tidak efektif pada tanah masam (Pengnoo et al., 2007). Kombinasi dua hingga tiga senyawa logam-P, bila digunakan bersamaan menggantikan TCP tunggal sebagai faktor seleksi awal dapat menjadi solusi untuk meningkatkan kualitas seleksi MPF.

PERAN MPF DALAM MENINGKATKAN PERTUMBUHAN TANAMAN

Mikroba pelarut fosfat dapat dijadikan pupuk hayati yang meningkatkan jumlah fosfor terlarut (Hidayat et al., 2020). Hal ini dibuktikan oleh penelitian Della Mónica et al. (2020) yang menemukan bahwa inokulasi jamur pelarut fosfat *Talaromyces helices* L7B dan jamur mikoriza arbuskular *Rhizophagus irregularis* dapat meningkatkan fosfor tersedia sebesar 50% dibandingkan dengan kontrol. Inokulasi bakteri pelarut fosfat juga dapat meningkatkan fosfor tersedia dan biomassa tanaman cabai dan jagung serta memperbaiki sifat kimia tanah yaitu meningkatkan C-organik dan KTK tanah (Hidayat et al. 2020). Selain itu, bakteri pelarut fosfat ditemukan dapat membantu pertumbuhan tanaman dengan merangsang efisiensi fiksasi nitrogen biologis, mensintesis fitohormon dan meningkatkan ketersediaan Zn dan Fe (Swarnalakshmi et al., 2013). Selain melarutkan fosfat, beberapa bakteri pelarut fosfat juga menunjukkan potensi sebagai agen biokontrol terhadap beberapa patogen tanaman dengan memproduksi senyawa anti jamur (seperti PAL, fenolat dan flavonoid), siderofor, antibiotik, hidrogen sianida dan enzim litik yang dapat meningkatkan penghambatan pertumbuhan patogen tanaman (Tallapragada & Gudimi, 2011). Mikroorganisme pelarut fosfat (MPF) dapat meningkatkan ketersediaan fosfor tanpa mengganggu komposisi biokimia tanah

Beberapa penelitian mengenai aplikasi MPF juga telah dilakukan pada pembibitan kelapa sawit. Pada penelitian Istina et al. (2015) menunjukkan bahwa mikroba pelarut fosfat meningkatkan pertumbuhan bibit kelapa sawit, serapan fosfor, kandungan hara, bobot segar dan bobot kering batang serta akar. Selain itu, penelitian Oppong (2015) juga menemukan bahwa MPF dapat meningkatkan bobot kering dan ketersediaan P pada bibit tanaman kelapa sawit. Selanjutnya, Kalayu (2019) menyebutkan bahwa MPF dapat digunakan untuk berbagai tanaman dan tidak spesifik inang. Oleh karena itu, dapat dikatakan bahwa penggunaan pupuk hayati pelarut fosfat menjanjikan untuk meningkatkan produksi hasil pertanian serta lebih ramah lingkungan (Babalola & Glick, 2012). Aplikasi MPF yang dikombinasikan dengan TCP juga ditemukan dapat meningkatkan pertumbuhan vegetatif tanaman (Oppong, 2015). Sementara itu, formulasi pupuk hayati berpengaruh terhadap kemampuan aktivitas mikroba pelarut fosfat. Fitriatin et al. (2014)

melaporkan bahwa campuran gambut dan kompos sebagai pembawa memberikan pengaruh terbaik terhadap populasi mikroba pelarut fosfat.

KESIMPULAN

Di antara seluruh populasi mikroba di tanah, 1-50 % merupakan bakteri pelarut fosfat dan 0,1- 0,5 % merupakan jamur pelarut fosfat. MPF melarutkan fosfat anorganik melalui beberapa cara yaitu produksi asam organik, produksi asam anorganik, melepas proton, produksi siderofor dan ekpolisakarida. Pelarutan fosfat organik terjadi melalui proses mineralisasi yang dikatalis oleh enzim. Isolasi dan pemurnian MPF dilakukan dengan medium pikovskaya dan NBRIP. MPF terbukti dapat membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman kelapa sawit dan tanaman lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Alori, E. T., Glick, B. R., & Babalola, O. O. (2017). Microbial phosphorus solubilization and its potential for use in sustainable agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 8(971), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00971>
- Atekan, Nuraini, Y., Handayanto, E., & Syekhfani. (2014). The Potential of phosphate solubilizing bacteria isolated from sugarcane wastes for solubilizing phosphate. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 1(4), 175–182. <https://doi.org/10.15243/jdmlm.2014.014.175>
- Babalola, O. O., & Glick, B. R. (2012). Indigenous African agriculture and plant associated microbes: Current practice and future transgenic prospects. *Scientific Research and Essays*, 7(28), 2431–2439. <https://doi.org/10.5897/sre11.1714>
- Bashan, Y., Kamnev, A. A., & de-Bashan, L. E. (2013). A proposal for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that enhance plant growth. *Biology and Fertility of Soils*, 49(1), 1–2. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0756-4>
- Bashan, Y., Kamnev, A. A., & De-Bashan, L. E. (2012). Tricalcium phosphate is inappropriate as a universal selection factor for isolating and testing phosphate-solubilizing bacteria that

- enhance plant growth: A proposal for an alternative procedure. *Biology and Fertility of Soils*, 49(4), 465–479. <https://doi.org/10.1007/s00374-012-0737-7>
- Chen, Y. P., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W. A., & Young, C. C. (2006). Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and their tricalcium phosphate solubilizing abilities. *Applied Soil Ecology*, 34(2006), 33–41.
- Cherchali, A., Boukhelata, N., Kaci, Y., Abrous-Belbachir, O., & Djebbar, R. (2019). Isolation and identification of a phosphate-solubilizing *Paenibacillus polymyxa* strain GOL 0202 from durum wheat (*Triticum durum* Desf.) rhizosphere and its effect on some seedlings morphophysiological parameters. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 19(2019), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2019.101087>
- Dandessa, C., & Bacha, K. (2018). Review on Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 6(11), 48–55. <https://doi.org/10.20546/ijcrar.2018.611.006>
- Della Mónica, I. F., Godeas, A. M., & Scervino, J. M. (2020). In Vivo Modulation of Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis and Soil Quality by Fungal P Solubilizers. *Microbial Ecology*, 79(1), 21–29. <https://doi.org/10.1007/s00248-019-01396-6>
- Ferreira, C. M. H., Vilas-Boas, Â., Sousa, C. A., Soares, H. M. V. M., & Soares, E. V. (2019). Comparison of five bacterial strains producing siderophores with ability to chelate iron under alkaline conditions. *AMB Express*, 9(78), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s13568-019-0796-3>
- Fitriatin, B. N., Yuniarti, A., Turmuktini, T., & Ruswandi, F. K. (2014). The effect of phosphate solubilizing microbe producing growth regulators on soil phosphate, growth and yield of maize and fertilizer efficiency on Ultisol. *Eurasian Journal of Soil Science (Ejss)*, 3(2014), 101–107. <https://doi.org/10.18393/ejss.34313>
- Florentino, A., Weijma, J., Stams, A., & Sanchez-Andrea, I. (2016). Ecophysiology and application of acidophilic sulfur-reducing. In *Rampelotto H (ed) Biotechnology of Extremophiles* (pp. 141–715). Cham: microorganisms Springer.
- Gaind, S. (2016). Phosphate dissolving fungi: Mechanism and application in alleviation of salt stress in wheat. *Microbiological Research*, 193(2016), 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2016.09.005>
- Guang-can, T., Shu-jun, T., Miao-ying, C., & Guang-hui, X. (2008). Phosphate-Solubilizing and -Mineralizing Abilities of Bacteria Isolated from Soils. *Pedosphere*, 18(4), 515–523.
- Hidayat, F., Sembiring, Z., Afrida, E., & Balatif, F. (2020). Aplikasi konsorsium bakteri penambat nitrogen dan pelarut fosfat untuk meningkatkan pertumbuhan jagung (*Zea mays*). *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 7(2), 249–254. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2020.007.2.8>
- Hii, Y. S., Yen San, C., Lau, S. W., & Danquah, M. K. (2020). Isolation and characterisation of phosphate solubilizing microorganisms from peat. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 26(2020), 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2020.101643>
- Ingle, K. P., & Padole, D. A. (2017). Phosphate Solubilizing Microbes: An Overview. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(1), 844–852. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.601.099>
- Irawan, A. F., Baskara, G., Wandri, R., & Asmono, D. (2020). Isolation and solubilisation of inorganic phosphate by *Burkholderia* spp. from the rhizosphere of oil palm. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 23(5), 667–673. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2020.667.673>
- Istina, I. N., Widiastuti, H., Joy, B., & Antralina, M. (2015). Phosphate-solubilizing Microbe from Saprists Peat Soil and their Potency to Enhance Oil Palm Growth and P Uptake. *Procedia Food Science*, 3(2015), 426–435. <https://doi.org/10.1016/j.profoo.2015.01.047>
- Jarosch, K. A., Doolette, A. L., Smernik, R. J., Tamburini, F., Frossard, E., & Bünemann, E. K. (2015). Characterisation of soil organic phosphorus in NaOH-EDTA extracts: A

- comparison of ^{31}P NMR spectroscopy and enzyme addition assays. *Soil Biology and Biochemistry*, 91(2015), 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.09.010>
- Kalayu, G. (2019). Phosphate solubilizing microorganisms: Promising approach as biofertilizers. *International Journal of Agronomy*, 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1155/2019/4917256>
- Kishore, N., K., P., Pindi, & Reddy, S. R. (2015). Plant biology and biotechnology: Plant diversity, organization, function and improvement. In *Plant Biology and Biotechnology: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement* (Vol. 1, pp. 1–827). India: Springer India. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2286-6>
- Krishnaraj, P. U., & Dahale, S. (2014). Mineral phosphate solubilization: Concepts and prospects in sustainable agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 80(2), 389–405. <https://doi.org/10.16943/ptinsa/2014/v80i2/55116>
- Kumar, R., & Shastri, B. (2017). Agro-Environmental Sustainability. In *Agro-Environmental Sustainability* (Vol. 1, pp. 271–303). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-49724-2>
- Kumar, S., Baudh, K., Barman, S. C., & Singh, R. P. (2014). Amendments of microbial biofertilizers and organic substances reduces requirement of urea and DAP with enhanced nutrient availability and productivity of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Ecological Engineering*, 71(2014), 432–437. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.007>
- Liu, Z., Li, Y. C., Zhang, S., Fu, Y., Fan, X., Patel, J. S., & Zhang, M. (2015). Characterization of phosphate-solubilizing bacteria isolated from calcareous soils. *Applied Soil Ecology*, 96(2015), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.08.003>
- Martínez, O. A., Crowley, D. E., Mora, M. L., & Jorquera, M. A. (2015). Short-term study shows that phytate-mineralizing rhizobacteria inoculation affects the biomass, phosphorus (P) uptake and rhizosphere properties of cereal plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(1), 153–166. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162015005000013>
- Mehta, P., Sharma, R., Putatunda, C., & Walia, A. (2019). Endophytic Fungi: Role in Phosphate Solubilization. In *Endophytic Fungal Research* (pp. 183–209). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03589-1_9
- Ochoa-Loza, F. ., Artiola, J. ., & Maier, R. . (2001). Stability Constants for the Complexation of Various Metals with a Rhamnolipid Biosurfactant. *Journal of Environmental Quality*, 30(2001), 479–485.
- Oppong, E. (2015). *The Use of Microbe Plus to Improve Phosphorus Availability from Rock Phosphate Under Oil Palm (Elaeis guineensis, Jacq.) Nursery*. Kwame Nkrumah University of Science and Technology.
- Panhwar, Q. A., Othman, R., Rahman, Z. ., Meon, S., & Ismail, M. . (2012). Isolation and characterization of phosphate-solubilizing bacteria from aerobic rice. *African Journal of Biotechnology*, 11(11), 2711–2719. <https://doi.org/10.5897/ajb10.2218>
- Pengnoo, A., Hashidoko, Y., Onthong, J., Gimsanguan, S., Manoon, S., Shinano, T., ... Osaki, M. (2007). Screening of phosphate-solubilizing microorganisms in rhizosphere and rhizoplane of adverse soil-adapting plants in Southern Thailand. *Tropics*, 16(1), 1–7. <https://doi.org/10.3759/tropics.16.1>
- Raj, D. P., Linda, R., & Babyson, R. S. (2014). Molecular characterization of Phosphate Solubilizing Bacteria (PSB) and Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) from pristine soils. *International Journal of Innovative Science, Engineering and Technology*, 1(7), 317–324.
- Rawat, P., Das, S., Shankhdhar, D., & Shankhdhar, S. C. (2020). Phosphate-Solubilizing Microorganisms: Mechanism and Their Role in Phosphate Solubilization and Uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 1(2020), 1–20. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00342-7>

- Rinu, K., Pandey, A., & Palni, L. Ma. S. (2012). Utilization of Psychrotolerant Phosphate Solubilizing Fungi Under Low Temperature Conditions of the Mountain Ecosystem. In *Microorganisms in Sustainable Agriculture and Biotechnology* (pp. 77–90). India: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2214-9>
- Rodríguez, H., Fraga, R., Gonzalez, T., & Bashan, Y. (2006). Genetics of phosphate solubilization and its potential applications for improving plant growth-promoting bacteria. *Plant and Soil*, 287(1–2), 15–21. <https://doi.org/10.1007/s11104-006-9056-9>
- Satyaprakash, M., Nikitha, T., Sadhana, B., Reddi, E. U. B., & Vani, S. S. (2017). Phosphorous and Phosphate Solubilising Bacteria and their Role in Plant Nutrition. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(4), 2133–2144. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.604.251>
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., & Gobi, T. A. (2013). Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *SpringerPlus*, 2(1), 1–14. <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>
- Sharma, S., Kumar, V., & Tripathi, R. B. (2011). Isolation of Phosphate Solubilizing Microorganism (PSMs) From Soil. *Journal of Microbiology and Biotechnology Research Scholars*, 1(2), 90–55.
- Shrivastava, M., Srivastava, P. C., & D'Souza, S. F. (2018). Phosphate-Solubilizing Microbes: Diversity and Phosphates Solubilization Mechanism. In *Role of Rhizospheric Microbes in Soil* (p p . 1 3 7 – 1 6 5) . https://doi.org/10.1007/978-981-13-0044-8_5
- Situmorang, E. C., Prameswara, A., Sinthya, H. C., Toruan-Mathius, N., & Liwang, T. (2015). Indigenous Phosphate Solubilizing Bacteria from Peat Soil for an Eco-friendly Biofertilizer in Oil Palm Plantation. *KnowledgeE*, 1(2015), 65–72. <https://doi.org/10.18502/ken.v1i1.324>
- Swarnalakshmi, K., Prasanna, R., Kumar, A., Pattnaik, S., Chakravarty, K., Shivay, Y. S., ... Saxena, A. K. (2013). Evaluating the influence of novel cyanobacterial biofilmed biofertilizers on soil fertility and plant nutrition in wheat. *European Journal of Soil Biology*, 55(2013), 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2012.12.008>
- Tabatabai, M. A., & Bremner, J. M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 1(4), 301–307.
- Tajini, F., Trabelsi, M., & Drevon, J. J. (2012). Combined inoculation with *Glomus intraradices* and *Rhizobium tropici* CIAT899 increases phosphorus use efficiency for symbiotic nitrogen fixation in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Saudi Journal of Biological Sciences*, 19(2012), 157–163. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2011.11.003>
- Tallapragada, P., & Gudimi, M. (2011). Phosphate solubility and biocontrol activity of *Trichoderma harzianum*. *Turkish Journal of Biology*, 35(5), 593–600. <https://doi.org/10.3906/biy-0911-4>
- Teng, Z., Chen, Z., Zhang, Q., Yao, Y., Song, M., & Li, M. (2019). Isolation and characterization of phosphate solubilizing bacteria from rhizosphere soils of the Yeyahu Wetland in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(33), 33976–33987. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2955-5>
- Zhu, F., Qu, L., Hong, X., & Sun, X. (2011). Isolation and characterization of a phosphate-solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao saltern on the coast of yellow sea of China. *Hindawi Publishing Corporation*, 2011, 1–6. <https://doi.org/10.1155/2011/615032>
- Zhu, J., Li, M., & Whelan, M. (2018). Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review. *Science of the Total Environment*, 612, 522–537. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.095>