
EVALUASI KEMAMPUAN ISOLAT MIKROBA DALAM MELARUTKAN FOSFAT DAN KALIUM**Oleh****Restiana Maulinda^{1*}, Elly Daru Ika Wilujeng²**¹Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Udayana²Department of Agricultural Production, Politeknik Negeri JemberEmail: restianamaulinda@unud.ac.id

Article History:

Received: 19-06-2026

Revised: 17-07-2026

Accepted: 22-07-2026

Keywords:Indeks Pelarutan,
Mikroba, Pelarut
Fosfat, Pelarut
Kalium

Abstract: Ketersediaan fosfor dan kalium dalam tanah sering kali terbatas. Sebagian besar fosfor dan kalium di dalam tanah berada dalam bentuk mineral yang sukar larut sehingga ketersediannya bagi tanaman relatif rendah. Mikroorganisme pelarut hara berpotensi meningkatkan ketersediaan unsur fosfor dan kalium, namun kestabilan kemampuan pelarutannya setelah penyimpanan kultur masih perlu dievaluasi. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan pelarutan fosfat dan kalium pada koleksi isolat fungi pelarut fosfat dan bakteri pelarut kalium setelah peremajaan kultur. Kemampuan pelarutan diuji menggunakan media Pikovskaya untuk pelarutan fosfat dan media Alexandrov untuk pelarutan kalium. Aktivitas pelarutan dievaluasi pembentukan zona bening di sekitar koloni dan dihitung sebagai indeks pelarutan (IP). Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh isolat masih mampu melarutkan fosfat dan kalium setelah peremajaan kultur yang ditandai dengan terbentuknya zona bening pada media selektif. Nilai indeks pelarutan fosfat (IP-F) berkisar 1,15-3,25, dengan nilai tertinggi pada isolat FPF₄ (3,25). Sementara itu, indeks pelarutan kalium (IP-K) berkisar 1,80-5,80, dengan nilai tertinggi pada isolat FRS₂ (5,80). Temuan ini menunjukkan bahwa kemampuan fungsional isolat dalam melarutkan mineral tetap terpelihara setelah penyimpanan sehingga berpotensi dieprtahankan sebagai koleksi mikroba untuk pengembangan biofertilizer.

PENDAHULUAN

Fosfor dan Kalium merupakan unsur hara makro esensial yang berperan penting dalam pertumbuhan dan produktivitas tanaman. Meskipun kandungan total fosfor dan kalium di dalam tanah relatif tinggi, sebagian besar unsur tersebut berada dalam bentuk terikat pada mineral tanah sehingga hanya sebagian kecil yang tersedia bagi tanaman (Shen *et al.*, 2011; Sattar *et al.*, 2019). Ketersediaan fosfor dan kalium yang rendah menyebabkan efisiensi pemupukan menurun karena sebagian pupuk yang diberikan kembali terjerap oleh mineral tanah. Pada tanah masam, fosfor umumnya terfiksasi oleh mineral Fe dan Al, sedangkan pada tanah alkalis fosfor membentuk senyawa kalsium yang sukar larut (Penn & Camberato, 2019; De Zutter *et al.*, 2022). Sebaliknya, sebagian besar kalium berada dalam struktur mineral

silikat seperti feldspar dan mika sehingga sulit tersedia bagi tanaman (Sattar *et al.*, 2019).

Salah satu pendekatan biologis yang banyak dikembangkan untuk meningkatkan ketersediaan fosfor dan kalium adalah pemanfaatan mikroorganisme pelarut hara. Mikroorganisme pelarut fosfat berperan meningkatkan kelarutan hara melalui produksi asam organik, pembentukan senyawa pengkelat, serta aktivitas enzim fosfatase yang membantu melepaskan fosfat dari bentuk tidak tersedia (Fitriatin *et al.*, 2022). Sementara itu, mikroorganisme pelarut kalium berperan dalam meningkatkan ketersediaan kalium melalui proses pelapukan mineral silikat yang mengandung kalium, seperti feldspar dan mika, yang dipengaruhi oleh produksi asam organik, pelepasan proton, dan pembentukan senyawa pengkelat (Sattar *et al.*, 2019; Olaniyah *et al.*, 2022). Kemampuan tersebut menjadikan mikroorganisme pelarut hara sebagai salah satu komponen penting dalam pengembangan biofertilizer yang ramah lingkungan (Timofeeva *et al.*, 2022).

Fungi pelarut fosfat (FPF) diketahui memiliki kemampuan dalam melarutkan fosfat tidak tersedia melalui produksi asam organik, senyawa pengkelat, dan enzim fosfatase yang berperan dalam pelepasan fosfat dari mineral tanah (Hallama *et al.*, 2019; Fitriatin *et al.*, 2020). Sementara itu, bakteri pelarut kalium (BPK) mampu meningkatkan pelepasan kalium dari mineral silikat melalui aktivitas metabolit seperti asam organik dan eksopolisakarida yang berperan dalam proses pelapukan mineral kalium (Prajapati *et al.*, 2012; Sattar *et al.*, 2019). Meskipun telah dikoleksi sebagai kultur murni, isolat mikroba dapat mengalami perubahan karakter fisiologis selama periode penyimpanan. Proses penyimpanan jangka panjang dapat menyebabkan penurunan viabilitas sel, perubahan aktivitas metabolik, maupun perubahan kemampuan fungsional mikroorganisme. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa lama penyimpanan dapat memengaruhi jumlah sel hidup serta karakter fisiologis mikroba, sehingga evaluasi terhadap sifat fungsional isolat setelah penyimpanan menjadi penting (Revellin *et al.*, 2000; Miyamoto-Shinohara *et al.*, 2000).

Koleksi kultur mikroba merupakan sumber daya hayati penting yang mendukung kegiatan penelitian dan pengembangan *biofertilizer*. Keberhasilan preservasi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan mempertahankan viabilitas mikroorganisme, tetapi juga kestabilan sifat fungsionalnya. Oleh sebab itu, evaluasi karakter fisiologis isolat setelah periode penyimpanan diperlukan untuk memastikan kemampuan pelarutan fosfat maupun kalium tetap dipertahankan.

Evaluasi kemampuan pelarutan umumnya dilakukan menggunakan pendekatan kualitatif dan semi-kuantitatif menggunakan media *Pikovskaya* untuk pengujian pelarutan fosfat dan media *Alexandrov* untuk pengujian pelarutan kalium. Aktivitas pelarutan diamati berdasarkan pembentukan zona bening di sekitar koloni dan dievaluasi melalui perhitungan indeks pelarutan sebagai indikator kemampuan mikroorganisme dalam melarutkan mineral tidak tersedia (Nautiyal *et al.*, 1999; Estesami *et al.*, 2017). Pendekatan ini banyak digunakan sebagai metode awal untuk menyeleksi isolat yang masih memiliki kemampuan melarutkan fosfat maupun kalium sebelum dilakukan uji selanjutnya.

Meskipun berbagai penelitian telah melaporkan kemampuan mikroorganisme pelarut fosfat dan kalium sebagai kandidat *biofertilizer*, informasi mengenai kestabilan karakter fungsional isolat setelah penyimpanan jangka panjang masih relatif terbatas. Oleh karena itu, evaluasi terhadap koleksi isolat FPF dan BPK diperlukan untuk memastikan bahwa kemampuan pelarutan fosfat dan kalium tetap terpelihara sebelum dimanfaatkan

dalam penelitian lanjutan maupun pengembangan *biofertilizer*.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di laboratorium Bioteknologi Tanah, Fakultas Pertanian, IPB. Penelitian menggunakan koleksi isolat mikroba yang merupakan koleksi Laboratorium Bioteknologi Tanah. Isolat tersebut merupakan hasil eksplorasi dari beberapa tipe lahan, yaitu lahan pertanian di Cikabayan, lahan bekas tambang timah di Bangka, lahan bekas tambang emas di Pongkor dan lahan gambut satu juta hektar di Kalimantan.

Alat yang digunakan meliputi autoklaf, *laminar air flow* (LAF), cawan petri, jarum ose, inkubator, serta peralatan gelas laboratorium. Bahan yang digunakan yaitu media Pikovskaya untuk pengujian pelarutan fosfat, serta media Alexandrov untuk pengujian pelarutan kalium. Media Pikovskaya dengan komposisi terdiri atas 10 g glukosa; 5 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; 0,1 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,5 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 0,2 g NaCl; 0,2 g KCl; 0,5 g *yeast extract*; 0,0025 $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,0025 g $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; dan 20 g agar dalam 1 L akuades (Pikovskaya, 1948). Sedangkan media Alexandrov dengan komposisi 10 g glukosa; 5 mg FeCl_3 ; 0,5 g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,1 g CaCO_3 ; 2 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; 5 g feldspar; dan 30 g agar dalam 1 L akuades (Prajapati & Modi, 2012), dengan feldspar sebagai sumber kalium tidak larut yang berasal dari Malang, Jawa Timur.

Peremajaan Isolat. Sebelum dilakukan pengujian, seluruh isolat diremajakan pada media selektif. Isolat pelarut fosfat ditumbuhkan pada media Pikovskaya Agar, sedangkan isolat pelarut kalium ditumbuhkan pada media Alexandrov Agar. Media disterilisasi menggunakan autoklaf pada suhu 121°C selama 15 menit dengan tekanan 15 psi, kemudian didinginkan hingga mencapai suhu sekitar $45\text{--}50^\circ\text{C}$ sebelum dituangkan ke dalam cawan petri steril. Setiap isolat diinokulasikan secara aseptik pada kedua jenis media, yaitu media Pikovskaya dan media Alexandrov, menggunakan metode *spot inoculation* pada bagian tengah media. Selanjutnya kultur diinkubasi pada suhu $28 \pm 2^\circ\text{C}$ selama 3-7 hari hingga terbentuk koloni dan zona bening di sekitar koloni (Schoebitz *et al.*, 2013; Parmar *et al.*, 2016).

Uji Kemampuan Pelarutan Fosfat dan Kalium. Seluruh isolat diuji terhadap kemampuan melarutkan fosfat dan kalium secara terpisah menggunakan media Pikovskaya dan media Alexandrov. Dengan demikian, setiap isolat memperoleh dua nilai indeks pelarutan, yaitu indeks pelarutan fosfat (IP-F) dan indeks pelarutan kalium (IP-K). Kemampuan isolat dalam melarutkan fosfat dan kalium dievaluasi berdasarkan pembentukan zona bening di sekitar koloni pada masing-masing media selektif. Zona bening terbentuk akibat aktivitas mikroba dalam melarutkan mineral tidak tersedia melalui produksi asam organik, proton, dan senyawa metabolit lain yang menyebabkan pelepasan unsur fosfat atau kalium dari mineral terikat (Fitriatin *et al.*, 2022; Sattar *et al.*, 2019). Setelah inkubasi selama 4-7 hari atau hingga zona bening terbentuk secara jelas, diameter koloni dan diameter total zona bening diukur menggunakan penggaris. Kemampuan pelarutan dinyatakan sebagai Indeks Pelarutan (IP) yang dihitung menggunakan persamaan Edi-Premono *et al.*, (1996):

$$\text{IP Fosfat/Kalium} = \frac{\text{diameter zona bening} + \text{diameter koloni}}{\text{diameter koloni}}$$

Analisis Data. Data diameter koloni, diameter zona bening, dan indeks pelarutan dianalisis secara deskriptif dengan membandingkan nilai indeks pelarutan setiap isolat. Isolat yang masih mampu membentuk zona bening dan memiliki nilai indeks pelarutan yang tinggi dinyatakan masih memiliki aktivitas pelarutan fosfat maupun kalium sehingga berpotensi digunakan sebagai kandidat *biofertilizer*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian kemampuan pelarutan fosfat dan kalium menunjukkan adanya variasi aktivitas antar isolat mikroba. Berdasarkan pembentukan zona bening dan nilai indeks pelarutan (IP), seluruh isolat masih menunjukkan kemampuan melarutkan fosfat maupun kalium setelah dilakukan peremajaan kultur. Hal ini mengindikasikan bahwa karakter fungsional yang berkaitan dengan pelarutan mineral masih dipertahankan setelah proses penyimpanan dan peremajaan kultur (Revellin *et al.*, 2000; Miyamoto-Shinohara *et al.*, 2000). Pembentukan zona bening di sekitar koloni menunjukkan terjadinya proses pelarutan mineral akibat aktivitas metabolik mikroorganisme.

Zona bening terbentuk akibat aktivitas metabolik mikroorganisme yang menghasilkan berbagai senyawa metabolit, terutama asam organik dan proton yang mampu mengubah senyawa fosfat maupun kalium dari bentuk tidak larut menjadi bentuk yang lebih tersedia. Pada media Pikovskaya, asam organik menurunkan pH di sekitar koloni sehingga fosfat yang terikat oleh Ca, Fe, atau Al menjadi larut. Sedangkan, pada media Alexandrov pelarutan kalium berlangsung melalui mekanisme asidolisis, pertukaran kation, kompleksasi ion logam, serta percepatan pelapukan mineral silikat seperti feldspar (Nautiyal, 1999; Meena *et al.*, 2017; Sattar *et al.*, 2019; Olaniyan *et al.*, 2022). Oleh karena itu, diameter zona bening dapat digunakan sebagai indikator awal kemampuan mikroorganisme dalam melarutkan mineral. Namun, zona bening tidak berkorelasi secara langsung dengan jumlah fosfat atau kalium dengan jumlah fosfat atau kalium yang terlarut sehingga perlu dilakukan pengujian kuantitatif (Nautiyal, 1999). Nilai indeks pelarutan fosfat (IP-F) dan indeks pelarutan kalium (IP-K) masing-masing isolat disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Indeks pelarutan fosfat dan kalium isolat mikroba pada media Pikovskaya dan media Alexandrov

Kode Isolat	Kelompok Mikroba		Indeks Pelarutan Fosfat (IP-F)	Indeks Pelarutan Kalium (IP-K)
BPK ₅	Bakteri Kalium	Pelarut	2,40	1,95
BPK ₆	Bakteri Kalium	Pelarut	2,10	2,50
BPK ₇	Bakteri Kalium	Pelarut	2,20	1,80
BPK ₉	Bakteri Kalium	Pelarut	2,30	2,31
FPF ₄	Fungi Fosfat	Pelarut	3,25	5,70
FPF ₅	Fungi Fosfat	Pelarut	1,15	5,50
FRS ₂	Fungi Fosfat	Pelarut	2,09	5,80
FRS ₃	Fungi Fosfat	Pelarut	2,20	5,43

Berdasarkan hasil pengujian pada media Pikovskaya, seluruh isolat yang diuji menunjukkan kemampuan membentuk zona bening dengan nilai IP-F berkisar antara 1,15-3,25. Isolat FPF₄ menunjukkan nilai IP-F tertinggi, yaitu sebesar 3,25, sedangkan nilai terendah diperoleh pada isolat FPF₅ dengan IP-F sebesar 1,15. Nilai IP-F tertinggi pada isolat FPF₄ menunjukkan bahwa isolat tersebut memiliki kemampuan melarutkan fosfat yang lebih tinggi dibandingkan isolat lainnya dan masih mempertahankan karakter fungsionalnya setelah periode penyimpanan dan peremajaan kultur (Revellin *et al.*, 2000; Miyamoto-Shinohara *et al.*, 2000).

Fungi pelarut fosfat umumnya mampu melarutkan fosfat tidak tersedia melalui produksi berbagai senyawa asam organik seperti asam sitrat, oksalat, dan glukonat. Senyawa organik tersebut berperan dalam menurunkan pH di sekitar koloni sekaligus membentuk kompleks dengan ion Al, Fe, dan Ca sehingga fosfat yang semula tidak tersedia menjadi lebih tersedia bagi tanaman (Rodríguez & Fraga, 1999; Sharma *et al.*, 2013; Hallama *et al.*, 2019; Fitriani *et al.*, 2022). Selain itu, beberapa isolat bakteri kelompok BPK juga menunjukkan kemampuan pelarutan fosfat yang cukup baik. Isolat BPK₅ memiliki nilai IP-F sebesar 2,40 dan BPK₉ sebesar 2,30. Hasil tersebut menunjukkan bahwa isolat bakteri pelarut kalium juga memiliki kemampuan melarutkan fosfat. Kemampuan tersebut diduga berkaitan dengan produksi asam organik yang tidak hanya berperan dalam pelarutan kalium, tetapi juga mampu menurunkan pH di sekitar koloni dan melepaskan fosfat dari ikatan mineral melalui mekanisme kompleksasi ion logam (Rodríguez & Fraga, 1999; Sharma *et al.*, 2013; Meena *et al.*, 2017).

Perbedaan nilai IP-F antar isolat menunjukkan bahwa kemampuan pelarutan fosfat merupakan sifat spesifik masing-masing mikroorganisme yang dipengaruhi oleh

kemampuan menghasilkan metabolit pelarut. Isolat dengan nilai indeks rendah bukan berarti tidak memiliki kemampuan melarutkan fosfat, tetapi menunjukkan bahwa produksi metabolit pelarut fosfat kemungkinan lebih rendah dibandingkan isolat lain. Selain dipengaruhi oleh kemampuan metabolik isolat, aktivitas pelarutan juga dipengaruhi oleh komposisi media, sumber karbon, waktu inkubasi, serta pertumbuhan koloni sehingga nilai indeks pelarutan dapat berbeda antar isolat maupun kondisi pengujian (Nautiyal *et al.*, 1999).

Pengujian kemampuan pelarutan kalium menggunakan media Alexandrov menunjukkan adanya variasi nilai IP-K antar isolat dengan kisaran 1,80-5,80. Isolat FRS₂ memiliki kemampuan pelarutan kalium tertinggi dengan nilai IP-K sebesar 5,80. Tingginya nilai indeks pelarutan kalium pada isolat FPF₄ menunjukkan bahwa isolat tersebut memiliki kemampuan yang baik dalam melepaskan kalium dari mineral feldspar yang digunakan sebagai sumber kalium tidak larut pada media Alexandrov. Proses pelarutan kalium dari mineral feldspar terjadi melalui produksi asam organik, pelepasan proton, pertukaran kation, pembentukan kompleks dengan ion logam, serta aktivitas eksopolisakarida yang membantu mempercepat pelapukan mineral silikat sehingga ionK⁺ dilepaskan ke dalam medium (Meena *et al.*, 2017; Sattar *et al.*, 2019; Olaniyan *et al.*, 2022).

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa beberapa isolat fungi pelarut fosfat memiliki kemampuan melarutkan kalium yang tinggi. Hal tersebut menunjukkan bahwa kemampuan mikroorganisme dalam melarutkan mineral tidak selalu terbatas pada satu unsur tertentu. Produksi asam organik sebagai mekanisme utama pelarutan mineral memungkinkan satu isolat memiliki kemampuan melarutkan lebih dari satu jenis mineral, termasuk fosfat dan kalium (Sharma *et al.*, 2013; Satter *et al.*, 2019).

Pada kelompok bakteri pelarut kalium, nilai IP-K berkisar 1,80-2,50. Isolat BPK₆ menunjukkan nilai tertinggi, yaitu 2,50, sedangkan BPK₇ menunjukkan nilai terendah yaitu 1,80. Hasil tersebut menunjukkan bahwa isolat bakteri dalam penelitian ini masih memiliki kemampuan melarutkan kalium, meskipun aktivitasnya lebih rendah dibandingkan beberapa isolat fungi. Perbedaan nilai indeks pelarutan menunjukkan bahwa setiap isolat memiliki kemampuan fisiologis yang berbeda dalam menghasilkan senyawa pelarut mineral. Kemampuan tersebut dipengaruhi oleh karakter genetik isolat, aktivitas metabolisme, kemampuan menghasilkan asam organik, serta interaksi antara mikroorganisme dengan sumber mineral pada media pengujian (Sattar *et al.*, 2019).

Salah satu aspek penting dalam penelitian ini adalah mengevaluasi apakah koleksi isolat masih mempertahankan sifat fungsional setelah penyimpanan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa seluruh isolat masih mampu menghasilkan zona bening pada media selektif, yang menunjukkan bahwa kemampuan fungsional dalam melarutkan fosfat maupun kalium masih dipertahankan setelah penyimpanan. Kemampuan mempertahankan aktivitas setelah penyimpanan merupakan karakter penting dalam pengelolaan koleksi mikroorganisme. Kultur mikroba yang disimpan dalam jangka panjang dapat mengalami perubahan fisiologis, termasuk penurunan viabilitas, perubahan aktivitas metabolik, dan kehilangan sebagian karakter fungsionalnya. Revellin *et al.*, (2000) melaporkan bahwa proses penyimpanan dapat memengaruhi karakter fisiologis mikroorganisme, sedangkan Miyamoto-Shinohara *et al.*, (2000) menjelaskan bahwa keberhasilan preservasi tidak hanya ditentukan oleh keberadaan sel hidup, tetapi juga kemampuan mikroba mempertahankan

sifat biologisnya,

Pada penelitian ini, keberadaan nilai IP-F dan IP-K pada sebagian besar isolat menunjukkan bahwa koleksi mikroba masih memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut. Isolat FPF₄ menunjukkan nilai indeks pelarutan fosfat tertinggi sekaligus memiliki kemampuan pelarutan kalium yang tinggi, sedangkan FRS₂ menunjukkan nilai indeks pelarutan kalium tertinggi di antara seluruh isolat yang diuji. Kedua isolat tersebut berpotensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai kandidat mikroorganisme fungsional dalam formulasi biofertilizer, meskipun masih diperlukan pengujian kuantitatif, identifikasi molekuler, serta evaluasi efektivitasnya pada tanaman (Lynn et al., 2013; Meena et al., 2017; Sattar et al., 2019).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kemampuan pelarutan fosfat dan kalium masih dipertahankan oleh seluruh isolat setelah peremajaan kultur. Isolat FPF₄ menunjukkan indeks pelarutan fosfat tertinggi (IP-F 3,25), sedangkan isolat FRS₂ memiliki indeks pelarutan kalium tertinggi (IP-K 5,80). Hasil ini menunjukkan bahwa kedua isolat memiliki potensi untuk dikembangkan sebagai mikroorganisme fungsional untuk pengembangan *biofertilizer* dan perlu dikaji lebih lanjut melalui pengujian kuantitatif kemampuan pelarutan fosfat dan kalium, identifikasi molekuler, serta uji efektivitas isolat pada tanaman untuk mengonfirmasi potensi aplikasinya sebagai *biofertilizer*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] De Zutter, N., Ameye, M., Bekaert, B., Verwaeren, J., De Gelder, L., & Audernaert, K. (2022). Uncovering New Insights and Misconceptions on the Effectiveness of Phosphate Solubilizing Rhizobacteria in Plants: A Meta-Analysis. *Front. Plant. Sci.*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.858804>
- [2] Edi-Premono, M., Moawad, M. A., & Vleck, P. L. G. Effect of phosphate solubilizing *Pseudomonas putida* on the growth of maize and its survival in the rhizosphere. *Indones. J. Agric. Sci.*, 11, 13-23.
- [3] Etesami, H., Emami, S., & Alikhani, H. A. (2017). Potassium solubilizing bacteria (KSB): Mechanisms, promotion of plant growth, and future prospects-A review. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 897-911.
- [4] Fitriatin, B. N., Mulyani O., Herdiyantoro, D., Alahmadi, T. A., & Pellegrini, M. (2022). Metabolic characterization of phosphate solubilizing microorganisms and their role in improving soil phosphate solubility, yield of upland rice (*Oryza sativa* L.), and phosphorus fertilizers efficiency. *Frontier in Sustainable Food System*, 6, 1032708. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.1032708>
- [5] Hallama, M., Pekrum, C., Lambers, H., & Kandeler, E. (2019). Hidden miners-the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. *Plant Soil*, 434, 7-45.
- [6] Lynn, T. M., Win, H. S., Kyaw, E. P., Latt, Z. K., & Yu, S. S. (2013). Characterization of phosphate solubilizing and potassium decomposing strains and study on their effects on tomato cultivation. *IJIAS*, 3(4): 959-966.
- [7] Meena, V. S., Maurya, B. R., & Verma, J. P. (2013). Does a rhizospheric microorganism

- enhance K⁺ availability in agricultural soils? *Microbiol Res*, 169, 337-347.
- [8] Miyamoto-Shinohara, Y., Imaizumi, T., Sukenobe, J., Murakami, Y., Kawamura, S., & Komatsu, Y. (2000). Survival rate of microbes after freeze-drying and long-term storage. *Cryobiology*, 41(3), 251-255.
 - [9] Nautiyal, C. S. (1999). An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Microbiology Letters*, 170(1), 265-270.
 - [10] Olaniyan, F. T., Alori, E. T., Adekiya, A. O., Ayorinde, B. B., Daramola, F. Y., Osemwegie, O. O., & Babalola, O. O. (2022). The use of soil microbial potassium solubilizers in potassium nutrient availability in soil and its dynamics. *Annals of Microbiology*, 72(45), 1-12.
 - [11] Parmar, K. B., Mehta, B. P., & Kunt, M. d. (2016). Isolation, characterization and identification of potassium solubilization bacteria from rhizosphere soil of maize (*Zea mays*). *Int. J. Sci. Environ. Technol*, 5, 3030-3037.
 - [12] Penn, C. J., & Camberato, J. J. (2019). A critical review on soil chemical processes that control how soil pH affects phosphorus availability to plants. *Agriculture*, 9(6), 120. <https://doi.org/10.3390/agriculture9060120>
 - [13] Pikovskaya, R. I. (1948). Mobilization of phosphorus in soil connection with the vital activity of some microbial species. *Microbiology*, 17, 362-370.
 - [14] Prajapati, K. B., & Modi, H. A. (2012). Isolation and characterization of potassium solubilizing bacteria from ceramic industry soil. *CIBTech Journal of Microbiology*, 1, 8-14.
 - [15] Revellin, C., Muenier G., Giraud, J. J., Sommer, G., Wadoux P., & Catroux G. (2000). Changes in the physiological and agricultural characteristics of peat-based *Bradyrhizobium japonicum* inoculants after long-term storage. *Appl Microbiol Biotechnol*, 54(2), 206-211.
 - [16] Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology Advances*, 17, 319-339.
 - [17] Sattar, A., Naveed, M., Ali, M., Zahir, Z. A., Nadeem, S. M., Yaseen, M., Singh, V., Farooq, M., Singh, R., Rahman, M., & Meena, H. N. (2019). Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review. *Applied Soil Ecology*, 133, 146-159. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2018.11.019>
 - [18] Schoebitz, M., Ceballos, C., & Ciampi, L. (2013). Effect of immobilized phosphate solubilizing bacteria on wheat growth and phosphate uptake. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(1).
 - [19] Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., Gobi, T. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus*, 2, 587.
 - [20] Shen J., Yuan L., Zhang J., Li H., Bai Z., Chen X., Zhang W., Zhang D. (2011). Phosphorus dynamics: from soil to plant. *Plant Physiol*, 156(3):997-1005.
 - [21] Timofeeva, A., Galyamova, M., & Sedykh, S. (2022). Prospects for using phosphate-solubilizing microorganisms as natural fertilizers in agriculture. *Plants*, 11(6), 2119. <https://doi.org/10.3390/plants11162119>