

Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan

by Refa Firgiyanto

Submission date: 05-Apr-2023 04:13AM (UTC+0700)

Submission ID: 2055975370

File name: k_Mikroorganisme_Pelarut_Fosfat_pada_Pertanian_Berkelanjutan.pdf (21.18M)

Word count: 37773

Character count: 243888



Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Pada Pertanian Berkelanjutan



Muhammad Asril ■ Widya Lestari ■ Basuki
Muhammad Fahyu Sanjaya ■ Refa Firgiyanto
Baso Manguntungi ■ Sri Sudewi ■ Monica Kharisma Swandi,
Maria Paulina ■ Wiwin Rewini Kunusa

Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Pada Pertanian Berkelanjutan



UU 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Perlindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- a. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- b. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- c. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- d. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
2. Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).

Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan

1

Muhammad Asril, Widya Lestari, Basuki

Muhammad Fahyu Sanjaya, Refa Firgiyanto, Baso Manguntungi

Sri Sudewi, Monica Kharisma Swandi

Maria Paulina, Wiwin Rewini Kunusa



Penerbit Yayasan Kita Menulis

Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan

Copyright © Yayasan Kita Menulis, 2023

Penulis:

Muhammad Asril, Widya Lestari, Basuki
Muhammad Fahyu Sanjaya, Refa Firgiyanto, Baso Manguntungi
Sri Sudewi, Monica Kharisma Swandi
Maria Paulina, Wiwin Rewini Kunusa

Editor: Matias Julyus Fika Sirait

Desain Sampul: Devy Dian Pratama, S.Kom.

Penerbit

Yayasan Kita Menulis

Web: kitamenulis.id

e-mail: press@kitamenulis.id

WA: 0821-6453-7176

IKAPI: 044/SUT/2021

Muhammad Asril., dkk.

Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan

Yayasan Kita Menulis, 2023

xvi; 152 hlm; 16 x 23 cm

ISBN: 978-623-342-776-0

Cetakan 1, Maret 2023

- I. Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan
- II. Yayasan Kita Menulis

Katalog Dalam Terbitan

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang memperbanyak maupun mengedarkan buku tanpa

Izin tertulis dari penerbit maupun penulis

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya kepada para penulis "Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan".

1

Dalam konteks peningkatan produktivitas tanaman, fosfor atau fosfat adalah nutrisi penting bagi tanaman. Fosfat diketahui penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman, karena senyawa fosfor terlibat dalam berbagai reaksi fisiologis dan biokimia. Fosfat dikenal sebagai salah satu faktor terpenting yang membatasi hasil panen. Fosfor (P) merupakan salah satu unsur esensial yang berperan dalam berat kering tanaman dan salah satu unsur logam paling melimpah di tanah baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Meskipun keberadaannya dalam konsentrasi tinggi, namun hanya 0,1% dari total P yang tersedia untuk tanaman karena kelarutannya yang rendah dan kemampuan fiksasinya di tanah dengan unsur beberapa logam lain di dalam tanah seperti Ca, Al, Fe untuk membentuk kalsium fosfat, aluminium fosfat dan besi fosfat. Hal ini menyebabkan tidak tersedianya fosfat bagi tanaman sehingga dibutuhkan mikroba pelarut fosfat yang berperan dalam menyediakan fosfat bagi tanaman.

Buku ini mengkaji secara komprehensif tentang :

Bab 1 Pendahuluan, Ketersediaan Fosfat di Tanah dan Interaksinya dengan Tanaman

Bab 2 Mikroorganisme Pelarut Fosfat dan Penyebarannya

Bab 3 Mekanisme Pelarutan Fosfat

Bab 4 Mikroba Pelarut Fosfat sebagai Pamacu Tumbuh Tanaman

Bab 5 Pemanfaatan Mikroorganisme Pelarut Fosfat Untuk Efisiensi Pemupukan Fosfat

Bab 6 Genetika Mikroba Pelarut Fosfat

Bab 7 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat

1**Bab 8 Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan****Bab 9 Simbiosis Tripartite antara Mikroba Pelarut Fosfat, Pemfiksasi Nitrogen, dan Mikoriza Arbuskula serta Hubungannya terhadap Respon Tanaman****Bab 10 Rekayasa Genetika Mikroba Pelarut Fosfat dan Prospek Masa Depan****3**

Dalam penyusunan buku ini, penulis mendapatkan informasi dan data dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, artikel, laporan ilmiah yang mendukung penyampaian materi secara faktual sehingga buku ini dapat terjamin kesahihan informasi yang disampaikan.

Akhir kata, penulis sampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan dalam penyusunan buku ini dari awal hingga akhir. Semoga Allah SWT senantiasa meridhai usaha ini dan menjadi ladang pahala bagi penulis dalam menyampaikan ilmu yang dimiliki. Aamiin.

Maret 2023

Penulis

Daftar Isi

Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	xi
Daftar Tabel.....	xv

1

Bab 1 Pendahuluan, Ketersediaan Fosfat di Tanah dan Interaksinya dengan Tanaman

1.1 Pendahuluan.....	1
1.2 Fosfat dan Sifat Biokimia Tanah serta Hubungannya dengan Ketersediaan Hayati Fosfat.....	3
1.3 Kebutuhan Mikroba Pelarut Fosfat dan Nutrisi Fosfat Tanaman	7
1.4 Kerangka Konsep Bagaimana Tanaman Memengaruhi Dinamika Fosfat di Tanah.....	10

Bab 2 Mikroorganisme Pelarut Fosfat dan Penyebarannya

2.1 Pendahuluan.....	13
2.2 Bakteri Pelarut Fosfat.....	15
2.2.1 Jenis Bakteri Pelarut Fosfat.....	16
2.3 Jamur Pelarut Fosfat.....	17
2.3.1 Jenis Jamur Pelarut Fosfat.....	17
2.3.2 Isolasi Mikroba Pelarut Fosfat.....	18

Bab 3 Mekanisme Pelarutan Fosfat

3.1 Pendahuluan.....	23
3.2 Fungsi dan Hambatan Fosfat	25
3.3 Sumber Fosfat.....	27
3.4 Fiksasi Fosfat	29
3.4.1 Fiksasi Fosfat Pada Tanah Dengan Kondisi Masam.....	29
3.4.2 Fiksasi Fosfat Pada Tanah Dengan Kondisi Basa	30
3.5 Pelarutan Mineral Fosfat.....	31

1

Bab 4 Mikroba Pelarut Fosfat sebagai Pemacu Tumbuh Tanaman

4.1 Pendahuluan.....	35
4.2 Habitat Mikroba Pelarut Posfat	36
4.3 Potensi Mikroba Pelarut Posfat sebagai Pemacu Tumbuh Tanaman	39
4.4 Perkembangan Mikroba Pelarut Posfat terhadap Produktivitas Tanaman..	42

1

Bab 5 Pemanfaatan Mikroorganisme Pelarut Fosfat Untuk Efisiensi Pemupukan Fosfat

5.1 Pendahuluan.....	47
5.2 Jenis-Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat	49
5.3 Mekanisme Pelarutan Fosfat oleh Mikroorganisme dalam Efisiensi Pemupukan.....	52

Bab 6 Genetika Mikroba Pelarut Fosfat

6.1 Pendahuluan.....	57
6.2 Genetik Pelarutan Mineral Fosfat.....	58
6.3 Genetik Pelarutan Fosfat Organik.....	61
6.4 Isolasi dan Karakterisasi Gen Penyandi Acid Phosphatase.....	63

Bab 7 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat

7.1 Pendahuluan.....	67
7.2 Golongan Mikroorganisme Pelarut Fosfat	68
7.3 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat.....	70
7.3.1 Biakan Agar	70
7.3.2 Biakan Cair	72
7.3.3 Biakan Dengan Minyak Mineral	73
7.3.4 Biakan Kering.....	74
7.3.5 Biakan Kering Beku (Freeze Drying).....	76
7.4 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat Dengan Bahan Pembawa (Carrier)	78
7.4.1 Jerami Padi dan Sekam Padi.....	79
7.4.2 Limbah Tahu.....	80
7.4.3 Gambut.....	80
7.4.4 Tandan Kosong Kelapa Sawit.....	80
7.4.5 Eceng Gondok	81
7.4.6 Tepung Tapioka dan Talk Powder	81

1**Bab 8 Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan**

8.1 Pendahuluan.....	83
8.2 Teknik Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat	84
8.3 Faktor yang Memengaruhi Keberhasilan dan Masa Hidup Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat.....	87
8.3.1 Viabilitas Mikroba.....	87
8.3.2 Sinergitas Mikroba	89
8.3.3 Pemilihan Bahan Pembawa (carrier).....	91
8.4 Faktor yang Memengaruhi Kegagalan Aplikasi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan.....	92
8.4.1 Kualitas Kemampuan Mikroba	92
8.4.2 Kemampuan Adaptasi dan Kompetisi Mikroba.....	92
8.4.3 Manajemen Aplikasi	93

1**Bab 9 Simbiosis Tripartite antara Mikroba Pelarut Fosfat, Pemfiksasi Nitrogen, dan Mikoriza Arbuskula serta Hubungannya terhadap Respon Tanaman**

9.1 Pendahuluan.....	95
9.2 Mikroba Pelarut Fosfat.....	96
9.2.1 Hubungan Mikroba Pelarut Fosfat dengan Tanaman.....	97
9.3 Nitrogen Tanah dan Tanaman	98
9.3.1 Sumber Nitrogen Tanah.....	99
9.3.2 Penambatan Nitrogen oleh Bakteri Simbiosis.....	99
9.3.3 Penambatan Nitrogen oleh Bakteri Hidup Bebas	101
9.3.4 Hubungan Pemfiksasi Nitrogen dengan Tanaman	101
9.4 Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA).....	102
9.4.1 Isolasi dan Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskula.....	104
9.4.2. Identifikasi dan Morfologi Spora	105
9.4.3 Hubungan Fungi Mikoriza Arbuskula dengan Pertumbuhan Tanaman.....	105

1**Bab 10 Rekayasa Genetika Mikroba Pelarut Fosfat dan Prospek Masa Depan**

10.1 Pendahuluan.....	107
10.2 Tinjauan Umum Rekayasa Genetik	109
10.2.1 Prinsip Dasar dan Tujuan Rekayasa Genetik	109
10.2.2 Istilah-istilah dalam Rekayasa Genetik	110
10.3 Rekayasa Genetik Mikroba Pelarut Fosfat	113
10.3.1 Unsur Fosfat (P) dalam Lingkungan Hidup	113

10.3.2 Jenis–Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat	114
10.3.3 Mekanisme Kerja Mikroba Pelarut Fosfat	115
10.4 Produk Komersialisasi Mikroba diBidang Pertanian di Pasar Dunia....	116
Daftar Pustaka	119
Biodata Penulis	147

Daftar Gambar

Gambar 1.1: Beberapa Jalur Biokimia Pelarutan Fosfat Oleh Bakteri Tanah..	6
Gambar 1.2: Absorpsi Berbagai Bentuk Fosfat Di Tanah Oleh Tanaman Pada Berbagai Kondisi Lingkungan.....	8
Gambar 1.3: Strategi dan Mekanisme Penyerapan Fosfor (P) oleh Tanaman.	9
Gambar 1.4: Jalur Transfer Fosfor (P) dan Proses Tanaman-Mikroba Yang	
5 Memengaruhi Ketersediaan P Melalui Tanaman Penutup Tanah....	11
Gambar 2.1: Mikroorganisme Pelarut Fosfat Yang Membentuk Zona Bening....	19
Gambar 3.1: Gejala Defisiensi Kekurangan Unsur Hara Fosfor.....	23
Gambar 3.2: Adenosin Tripospat (ATP).....	25
Gambar 3.3: Fosforosasi Oksidatif	26
Gambar 3.4: Layu Fusarium	26
Gambar 3.5: Hubungan Ketersediaan Hara Fosfat dengan pH Tanah	27
Gambar 3.6: Batuan Fosfat Apatit, Monasik, dan Guano kelelawar	28
Gambar 3.7: Sebaran Fosfat di Indonesia	28
Gambar 3.8: Pelarutan Fosfat	31
Gambar 3.9: Pelarutan Mineral Fosfat oleh Bakteri.....	32
Gambar 3.10: Mekanisme Asam Organik Pelarutan Fosfat dari Trikalsium Fosfat	32
Gambar 3.11: Mekanisme Asam Organik Pelarutan Fosfat dari Strengite	33
Gambar 4.1: Keragaman Biota Pada Habitat Dibawah Permukaan Tanah .	37
Gambar 4.2: Sebaran Global Habitat Biota Tanah, Fungsi Ekosistemnya dan Biomassanya. a, b Sebaran Global Biota Tanah; c, d Sebaran Fungsi Ekosistem Biota Dalam Tanah; e Sebaran Biomassa Dan F Diagram Persentase	38
Gambar 5.1: (a-b). Hasil Isolasi Bakteri Pelarut Fosfat (a) Pemurnian Isolat CB1 (b) ..	51
Gambar 5.2: Pengaruh Mikroorganisme Pelarut P pada Tanaman.....	53
Gambar 6.1: Jalur Pembentukan Glukonat.....	59
Gambar 6.2: Jalur Spesifik Pembentukan Asam Glukonat Pada Gluconobacter ..	59
Gambar 6.3: Peta Genetik Gen Struktural pqq	60
Gambar 6.4: Skema Kerja Enzim Vitase	62

Gambar 7.1: Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) yang Membentuk Zona Bening	69
Gambar 7.2: Cendawan/Jamur Pelarut Fosfat <i>Talaromyces Aurantiacus</i> Dan <i>Aspergillus Neoniger</i> Yang Membentuk Zona Bening Asal Rizosfer Tanaman Bambu	69
Gambar 7.3: Khamir Pelarut Fosfat yang Membentuk Zona Bening Asal Lumut Antartika.....	70
Gambar 7.4: Media Agar Pikovskaya padat yang Ditambahkan Bromophenol Blue	71
Gambar 7.5: Media Pikovskaya Cair (a).....	72
Gambar 7.6: Media Pikovskaya Cair (b)	72
Gambar 7.7: Kultur Strain Mikroba Dalam Biakan Cair (Aquadest Steril).	73
Gambar 7.8: Kultur Strain Mikroba Dalam Media Agar Miring	74
Gambar 7.9: Mesin Freeze Drying	78
Gambar 7.10: Strain Bakteri Metode Freezer Drying Yang Disimpan Dalam Ampul Kaca Atau Vial Serum	77
Gambar 7.11: Pengeringan Beku Strain Bakteri Dalam Botol Kaca Dengan Volume Yang Berbeda	78
Gambar 8.1: Metode Uji Antagonisme Antara Bakteri Dan Fungi: A. Dual Culture, B. Plus Streaks, dan C. Quare Streak.....	90
Gambar 8.2: Uji Antagonisme Metode Dual Culture Antar Fungi: A. Tidak Ada Zona Hambat, B. Ada Zona Hambat	90
Gambar 8.3: Metode Uji Antagonisme Antar Bakteri: A. Cross Streak, B. Dual Culture	90
Gambar 8.4: Ilustrasi Bioformulasi Dengan Praktik Manajemen Aplikasi Pupuk Dengan Prinsip “4R” untuk Mengendalikan Pelepasan P dan Untuk Meningkatkan Efisiensi Agronomi Pupuk.....	94
Gambar 9.1: Mikroba Pelarut Fosfat.....	97
Gambar 9.2: Bintil Akar Pada Tanaman Legum.....	100
Gambar 9.3: <i>Anabaena Azolla</i>	100
Gambar 9.4: <i>Azotobacter</i> (kiri) dan <i>Clostridium</i> (Kanan).....	101
Gambar 9.5: Hubungan Antara Distribusi Bioma Sepanjang Gradien Utara Bumi Dan Peran Asosiasi Mikoriza Dalam Pengambilan N dan P .	103
Gambar 9.6: Akar Aren Yang Terinfeksi FMA di Lahan Pasca Tambang Yaitu Adanya Hifa (kiri) dan Vesikula (kanan) dengan Pembesaran 40 x Menggunakan Mikroskop.....	105
Gambar 9.7: Tipe spora FMA yaitu <i>Acaulospora</i> sp. (kiri), <i>Gigaspora</i> sp. (tengah), dan <i>Glomus</i> sp (kanan).....	105
Gambar 10.1: Rekayasa Proses Transgenik.....	110
Gambar 10.2: Perbanyak Tanaman Dengan Metode Kultur Jaringan.....	112

Gambar 10.3: Peran Mikroba Tanah Dalam Pengaturan Interaksi Tanaman dan Tanah	114
Gambar 10.4: Mekanisme Kerja Mikroba Pelarut Fosfat	115
Gambar 10.5: Mekanisme Reaksi Kimia Pembentukan Kompleks Kation	116

Daftar Tabel

Tabel 3.1: Kebutuhan Unsur Hara Fosfat pada Tanaman	23
Tabel 3.2: Sumber Fosfat	28
Tabel 3.3: Wilayah penghasil Pospat Alam.....	29
Tabel 4.1: Mikroba Pelarut Posfat di Alam	40
Tabel 4.2: Perusahaan-Perusahaan yang Memproduksi Biofertilizer PSM (Phosphate Solubilizing Microbes).....	44
Tabel 8.1: Kajian Pustaka Teknik Aplikasi Mikroba sebagai Pupuk Hayati Tanaman.....	85
Tabel 8.2: Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Hayati	87
Tabel 10.1: Lembaga Internasional yang Menyediakan Isolat-isolat Mikroba ...	117
Tabel 10.2: Jenis-jenis Mikroba yang Berpotensi untuk Dikomersialisasikan	117
Tabel 10.3: Beberapa Merk Pupuk Hayati di Indonesia.....	118

Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Pada Pertanian Berkelanjutan

Dalam konteks peningkatan produktivitas tanaman, fosfor atau fosfat adalah nutrisi penting bagi tanaman. Fosfat diketahui penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman, karena senyawa fosfor terlibat dalam berbagai reaksi fisiologis dan biokimia. Fosfat dikenal sebagai salah satu faktor terpenting yang membatasi hasil panen. Fosfor (P) merupakan salah satu unsur esensial yang berperan dalam berat kering tanaman dan salah satu unsur logam paling melimpah di tanah baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Meskipun keberadaannya dalam konsentrasi tinggi, namun hanya 0,1% dari total P yang tersedia untuk tanaman karena kelarutannya yang rendah dan kemampuan fiksasinya di tanah dengan unsur beberapa logam lain di dalam tanah seperti Ca, Al, Fe untuk membentuk kalsium fosfat, aluminium fosfat dan besi fosfat. Hal ini menyebabkan tidak tersedianya fosfat bagi tanaman sehingga dibutuhkan mikroba pelarut fosfat yang berperan dalam menyediakan fosfat bagi tanaman.

Buku ini mengkaji secara komprehensif tentang :

- Bab 1 Pendahuluan, Ketersediaan Fosfat di Tanah dan Interaksinya dengan Tanaman
- Bab 2 Mikroorganisme Pelarut Fosfat dan Penyebarannya
- Bab 3 Mekanisme Pelarutan Fosfat
- Bab 4 Mikroba Pelarut Fosfat sebagai Pemacu Tumbuh Tanaman
- Bab 5 Pemanfaatan Mikroorganisme Pelarut Fosfat Untuk Efisiensi Pemupukan Fosfat
- Bab 6 Genetika Mikroba Pelarut Fosfat
- Bab 7 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat
- Bab 8 Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan
- Bab 9 Simbiosis Tripartite antara Mikroba Pelarut Fosfat, Pemfiksasi Nitrogen, dan Mikoriza Arbuskula serta Hubungannya terhadap Respon Tanaman
- Bab 10 Rekayasa Genetika Mikroba Pelarut Fosfat dan Prospek Masa Depan



YAYASAN KITA MENULIS
press@kitamenulis.id
www.kitamenulis.id



Bab 1

Pendahuluan, Ketersediaan Fosfat di Tanah dan Interaksinya dengan Tanaman

1.1 Pendahuluan

Karena populasi manusia dunia terus meningkat, tuntutan yang ditujukan pada bidang pertanian untuk memasok makanan di masa depan akan menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi masyarakat agraris saat ini. Untuk menghadapi tantangan ini, banyak upaya yang berfokus pada sistem biologis tanah dan agroekosistem secara keseluruhan (Khan, Zaidi and Wani, 2007). Fokus pada sistem biologi tanah diperlukan untuk memahami dengan lebih baik proses dan interaksi kompleks yang mengatur stabilitas lahan pertanian (Asril et al., 2022). Pada saat ini, persediaan makanan (umumnya) tidak terbatas (sebaliknya, ada kekurangan distribusi makanan tepat waktu ke daerah-daerah yang membutuhkan) sebagian karena pertanian input tinggi, yang pada gilirannya menyebabkan revolusi hijau. Revolusi hijau telah menjadi salah satu kegiatan manusia yang paling berhasil dalam menghasilkan ketahanan pangan global dan akibatnya mengubah beberapa negara berkembang, seperti India, dari kekurangan pangan menjadi surplus pangan.

Namun, peningkatan populasi manusia yang konsisten dan mengkhawatirkan kembali mengancam ketahanan pangan dunia. Oleh karena itu ada kebutuhan mendesak untuk revolusi hijau kedua untuk meningkatkan produksi pangan sekitar 50% dalam 20 tahun ke depan untuk mempertahankan tekanan penduduk. Salah satunya dengan penggunaan pupuk kimia seperti pupuk fosfat.

Pembuatan pupuk fosfat yang larut dalam air (WSP) (superfosfat) telah memainkan peran penting dalam revolusi hijau dan umumnya direkomendasikan untuk memperbaiki defisiensi fosfor. Kebanyakan negara telah mengembangkannya, akan tetapi, negara-negara lain mengimpor pupuk ini, yang seringkali persediaannya terbatas dan menjadi pengeluaran besar bagi petani yang miskin sumber daya. Selain itu, intensifikasi produksi pertanian di negara-negara tersebut memerlukan penambahan fosfat tidak hanya untuk meningkatkan produksi tanaman tetapi juga untuk memperbaiki status fosfat tanah guna menghindari degradasi tanah lebih lanjut. Selain itu, penggunaan pupuk kimia juga mencapai penggunaan maksimum, secara teoritis tidak memberikan efek peningkatan lebih lanjut terhadap hasil panen. Namun, semakin jelas bahwa praktik pertanian konvensional tidak dapat mempertahankan basis produksi, sistem tanaman tanah yang sehat, membutuhkan waktu yang lama, sementara, untuk meningkatkan produktivitas tanaman, ahli agronomi sangat bergantung pada pupuk kimia (Khan, Zaidi and Wani, 2007).

¹ Dalam konteks peningkatan produktivitas tanaman, fosfor atau fosfat adalah nutrisi penting bagi tanaman. Fosfat diketahui penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman, karena senyawa fosfor terlibat dalam berbagai reaksi fisiologis dan biokimia. Fosfat dikenal sebagai salah satu faktor terpenting yang membatasi hasil panen (Timofeeva, Galyamova and Sedykh, 2022). Fosfor (P) merupakan salah satu unsur esensial yang berperan dalam berat kering tanaman. Fosfor adalah salah satu unsur logam paling melimpah yang ditemukan di kerak bumi dan terdapat di tanah baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Meskipun hadir dalam konsentrasi tinggi, hanya 0,1% dari total P yang tersedia untuk tanaman karena kelarutannya yang buruk dan kemampuan fiksasinya di tanah dengan unsur beberapa logam lain di dalam tanah seperti Ca, Al, Fe untuk membentuk kalsium fosfat, aluminium fosfat dan besi fosfat. Hal ini menyebabkan tidak tersedianya fosfat bagi tanaman (Ingle and Padole, 2017). Fosfor juga memiliki peran dalam komposisi berat kering tanaman. Sebanyak 0,2% berat kering tanaman dipengaruhi oleh fosfor.

Ini adalah yang unsur kedua setelah nitrogen di antara nutrisi mineral yang paling sering membatasi pertumbuhan tanaman (Azziz et al., 2012).

1.2 Fosfat dan Sifat Biokimia Tanah serta Hubungannya dengan Ketersediaan Hayati Fosfat

Tanah tropis dan subtropis sebagian besar bersifat asam, dan seringkali sangat kekurangan fosfor (Asril and Lisafitri, 2020; Asril, Y Lisafitri, et al., 2021) dengan kapasitas penyerapan (fiksasi) fosfor yang tinggi. Rata-rata, sebagian besar unsur hara mineral dalam larutan tanah terdapat dalam jumlah milimolar tetapi fosfor hanya terdapat dalam jumlah mikromolar atau lebih sedikit. Rendahnya kadar fosfor disebabkan tingginya reaktivitas fosfat terlarut dengan unsur lain. Misalnya, di tanah asam fosfor berasosiasi dengan senyawa aluminium dan besi, sedangkan kalsium fosfat adalah bentuk utama fosfat anorganik di tanah berkapur. Fosfat organik juga dapat menyusun sebagian besar fosfat terlarut. Sebanyak 50% fosfat organik terlarut terdapat pada tanah dengan kandungan bahan organik tinggi.

Masalah kekurangan fosfor dalam tanah secara konvensional diselesaikan dengan menggunakan pupuk fosfat. Namun, pupuk fosfat kimia dianggap tidak efektif dibandingkan dengan pupuk organik seperti pupuk kandang dan kompos. Namun, sebagian besar pupuk fosfat yang diterapkan tidak tersedia untuk tanaman dan penambahan pupuk anorganik melebihi jumlah yang biasa digunakan untuk mengatasi efek ini dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti pencemaran air tanah dan eutrofikasi saluran air (Kang et al., 2011). Oleh karena itu, perlu adanya strategi manajemen yang mampu meningkatkan efisiensi pemupukan fosfor, meningkatkan hasil tanaman dan mengurangi pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh kehilangan fosfor dari tanah. Meningkatkan bioavailabilitas fosfat bagi tanaman merupakan salah satu tujuan utama pertanian berkelanjutan (Alori, Glick and Babalola, 2017). Pertanian berkelanjutan, membutuhkan praktik pertanian yang lebih ramah terhadap lingkungan dan menjaga keseimbangan ekologi ekosistem tanah dalam jangka panjang. Dalam konteks ini, penggunaan inokulan mikroba (pupuk hayati) termasuk mikroba pelarut fosfat di bidang pertanian merupakan

alternatif ramah lingkungan untuk aplikasi pupuk mineral lebih lanjut (Asril, Yuni Lisafitri, et al., 2021; Zaman et al., 2021).

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro yang sangat penting untuk pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Maharajan et al., 2018). Ini terdiri dari 0,2 hingga 0,8% dari berat kering tanaman (Sharma et al., 2013) dan ditemukan dalam asam nukleat, enzim, koenzim, nukleotida, dan fosfolipid (Nesme, Metson and Bennett, 2018). Fosfor adalah makronutrien terpenting kedua yang diperlukan tanaman, setelah nitrogen. Fosfor memiliki kunci peran dalam proses metabolisme seperti fotosintesis, transfer energi, transduksi sinyal, fiksasi nitrogen pada kacang-kacangan, kualitas tanaman dan ketahanan terhadap penyakit tanaman adalah fitur utama yang terkait dengan nutrisi fosfor). Fosfor menjadi komponen struktural dari banyak koenzim, fosfo-protein, fosfolipid juga merupakan bagian dari memori genetik "DNA" dari semua organisme hidup. Ini terlibat dalam transfer dan penyimpanan energi yang digunakan untuk pertumbuhan dan reproduksi. Fosfor memainkan peran utama dalam terutama dalam fotosintesis, karbon metabolisme, dan pembentukan membran juga berperan penting dalam pemanjangan akar, proliferasi, dan defisiensi fosfor memengaruhi arsitektur akar. Sebagian besar fosfor yang diserap oleh tanaman terakumulasi dalam biji-bijian dalam bentuk asam fitat yang menjadi tidak tersedia bagi tanaman dan kekurangannya berdampak negatif terhadap hasil biji-bijian (Ingle and Padole, 2017).

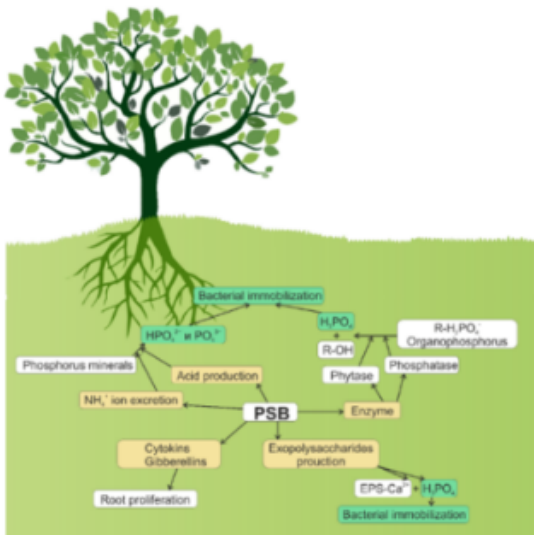
Kandungan fosfor rata-rata dalam tanah sekitar 0,05% dengan hanya 0,1% dari jumlah tersebut dalam bentuk tersedia untuk digunakan oleh tanaman (Zhu et al., 2011). Akar tanaman dapat menyerap fosfor dalam bentuk ortofosfat H_2PO_4^- atau HPO_4^{2-} , tetapi konsentrasi ion-ion ini di dalam tanah berada di kisaran mikromolar (Ai et al., 2009). Di tanah, sebagian besar fosfat hadir sebagai besi, aluminium, dan kalsium fosfat yang tidak larut. Fosfat terlibat dalam berbagai reaksi fisiologis dan biokimia, termasuk fotosintesis, perkembangan akar dan batang, pembentukan bunga dan biji, pematangan tanaman, fiksasi nitrogen pada kacang-kacangan, dan ketahanan terhadap penyakit tanaman. Fosfat adalah salah satu faktor terpenting yang membatasi hasil panen (Azziz et al., 2012). Masalah defisiensi fosfat dalam tanah secara konvensional diselesaikan dengan menggunakan pupuk fosfor. Namun, dengan anion fosfat dalam pupuk kimia menjadi sangat reaktif dan cepat diperbaiki karena interaksi dengan Ca^{2+} , Fe^{3+} , dan Al^{3+} di dalam tanah, sebagian besar fosfor yang ditambahkan ke pupuk tidak dapat diakses oleh tanaman. Dengan demikian, pembentukan kompleks garam fosfat terlarut yang sesuai menyebabkan efisiensi penggunaan pupuk

fosfat kimia hanya berkisar 5-25% (Timofeeva, Galyamova and Sedykh, 2022).

Keberadaan fosfat di tanah dalam bentuk anorganik maupun organik. Bentuk anorganik (mineral) fosfat diwakili oleh mineral primer (apatites, strengite, dan variscite) dan mineral sekunder fosfor (besi, aluminium, dan kalsium fosfat) (Arai and Sparks, 2007). Pelepasan fosfat dari mineral ini lambat dan diatur oleh beberapa faktor, terutama pH tanah (Devau et al., 2009; Asril, Yuni Lisafitri, et al., 2021). Dalam kondisi asam, fosfat teradsorpsi pada Al/Fe oksida dan hidroksida seperti gibbsite dan goethite. Dalam kondisi basa, fosfat diendapkan dengan kalsium. Selain itu, fosfor dapat diimobilisasi pada partikel lempung tanah, sebuah fenomena yang sangat dipengaruhi oleh jenis ion yang terserap pada permukaan mineral lempung (Mnkeni and MacKenzie, 1985).

Mikroorganisme tanah dapat melarutkan fosfat dari tanah (Asril and Lisafitri, 2019; Asril, Y Lisafitri, et al., 2021). Setelah diserap oleh sel mikroba, fosfor dimasukkan ke dalam struktur seluler mikroorganisme (misalnya, asam nukleat, ester fosfor organik, fosfat anorganik bebas, dan koenzim), dengan kelebihan fosfor cenderung disimpan sebagai polifosfat (Hallama et al., 2019). Biomassa mikroba adalah kumpulan fosfor terimobilisasi sementara yang penting yang dapat termineralisasi dan dilepaskan ke dalam larutan tanah sebagai fosfor yang tersedia dalam jangka panjang (Ehlers et al., 2010; Richardson and Simpson, 2011). Pada sebagian besar mikroorganisme, peran cadangan fosfat dimainkan oleh polifosfat anorganik, polimer linier asam fosfat yang mengandung antara tiga hingga beberapa ratus residu fosfat (Kulaev and Vagabov, 1983). Banyak bakteri menumpuk polifosfat dalam kondisi yang tidak menguntungkan (Hirota et al., 2010). Misalnya, akumulasi polifosfat dalam sel *E. coli* terjadi dalam kondisi kekurangan asam amino (Kuroda et al., 1997). Enzim yang mengkatalisasi sintesis polifosfat adalah poliP kinase. Peran poliP sebagai cadangan fosfat telah dibuktikan pada banyak mikroorganisme yang termasuk dalam taksa yang berbeda, dari archaea hingga jamur (Hirota et al., 2010). Polifosfat kaya akan “energi tinggi” dari ikatan anhidrida (Moradali and Rehm, 2020), dan dapat digunakan sebagai sumber energi karena pelepasan Pi (Karl, 2014). Berbagai enzim terlibat dalam konsumsi akumulasi polifosfat dan pemecahan fosfat di luar sel. Pemanfaatan dan degradasi polifosfat dikatalisis oleh polipas, termasuk *eksopolipase* (PPX), dan beberapa kinase spesifik polifosfat, termasuk *poliPglukokinase* dan *poliP-fruktokinase* (Hirota et al., 2010).

Biomassa mikroorganisme tanah menyimpan sejumlah besar fosfor, melindunginya dari adsorpsi tanaman (Seeling and Zasoski, 1993; Khan and Joergensen, 2009). Selama proses daur ulang biogeokimia, fosfor yang terakumulasi oleh bakteri dan jamur secara perlahan dilepaskan kembali ke dalam tanah dan menjadi tersedia bagi tanaman. Hal ini dibuktikan dengan korelasi antara serapan fosfor oleh tanaman dan biomassa fosfor dalam mikroorganisme (Sugito et al., 2010). Tingkat pelepasan fosfat dari biomassa mikroba kemungkinan tergantung pada jumlah fosfor yang tersedia di tanah (Spohn and Widdig, 2017), ketersediaan karbon (Muhammad Asghar Malik, 2012), tekstur tanah (Chen and He, 2002), dan komposisi komunitas mikroba (Dinh et al., 2017). Kemampuan mikroorganisme untuk menyeimbangkan antara proses solubilisasi (mineralisasi) dan imobilisasi menentukan sejauh mana bakteri dan jamur tersebut dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dalam sistem tanah-tanaman (Gambar 1.1).



Gambar 1.1: Beberapa Jalur Biokimia Pelarutan Fosfat Oleh Bakteri Tanah (Timofeeva, Galyamova and Sedykh, 2022).

Sejumlah mikroorganisme heterotrofik mengeluarkan asam organik yang melarutkan P yang mengikat pasangan kationik ion P dan melepaskan P langsung ke dalam larutan. Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) ini telah digunakan sebagai biofertilizer sejak tahun 1950-an. Inokulan mikroba mengasimilasi P terlarut, dan mencegahnya dari adsorpsi atau fiksasi. Mikroorganisme ini memengaruhi kesuburan tanah melalui berbagai proses yaitu. dekomposisi, mineralisasi dan pelepasan nutrisi. Mikroorganisme meningkatkan

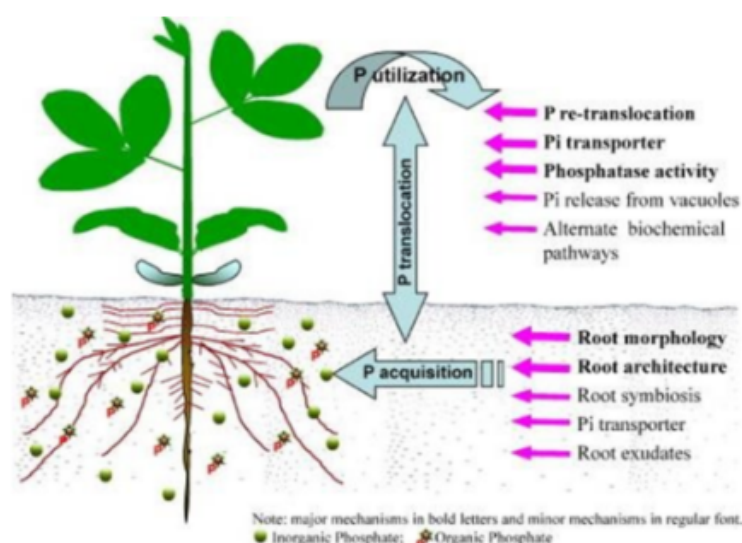
ketersediaan P bagi tanaman melalui pelarutan P anorganik menjadi bentuk tersedia. Oleh karena itu, inokulan mikroba digunakan sebagai sumber alternatif, baik ekonomis maupun ramah lingkungan. Eksplorasi berkelanjutan dari keanekaragaman hayati mikroorganisme tanah dan optimalisasi interaksi mikroba di rizosfer merupakan langkah prasyarat untuk mengembangkan inokulan mikroba yang lebih efisien dengan pelarut fosfor (Ingle and Padole, 2017).

1.3 Kebutuhan Mikroba Pelarut Fosfat dan Nutrisi Fosfat Tanaman

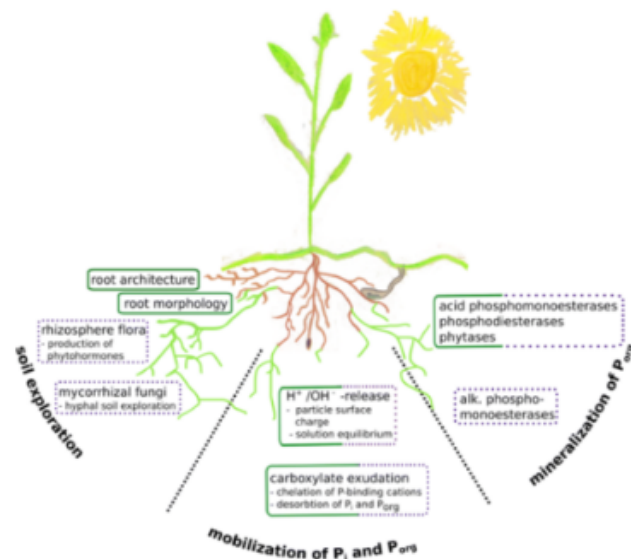
Produksi pupuk kimia fosfat merupakan proses yang sangat intensif yang membutuhkan energi senilai USD \$4 miliar per tahun untuk memenuhi kebutuhan global (Goldstein et al., 1993). Situasi ini semakin diperparah oleh fakta bahwa hampir 75-90% pupuk fosfat yang ditambahkan diendapkan oleh kompleks kation logam yang ada di dalam tanah (Stevenson, 1986). Akumulasi fosfat di tanah pertanian cukup untuk mempertahankan hasil panen maksimum di seluruh dunia selama sekitar 100 tahun (Goldstein et al., 1993). Dengan demikian, ketergantungan produksi pupuk pada sumber energi fosil dan prospek semakin berkurangnya ketersediaan input produksi pupuk yang mahal di tahun-tahun mendatang jelas telah membawa peran solubilisasi mineral fosfat ke permukaan. Karena itu, sangat penting untuk mengeksplorasi sumber fosfat alternatif. Di bawah kondisi tanah dan agroklimat yang beragam, organisme dengan kemampuan melarutkan fosfat telah terbukti menjadi alternatif yang ekonomis untuk superfosfat yang lebih mahal dan memiliki utilitas agronomis yang lebih besar. Sistem mikroba dapat mengambil nutrisi dalam jumlah yang cukup banyak dari reservoir alami dan memperkaya tanah dengan nutrisi yang penting tetapi masih jarang. Ekosistem mikroba tanaman dengan demikian dapat diberi energi dalam pertanian berkelanjutan dengan stabilitas ekologis dan kualitas lingkungan yang cukup besar. Pada umumnya fosfat dapat diakuisisi oleh tanaman dengan berbagai cara di berbagai kondisi lingkungan (Gambar 1.2 dan 1.3). Namun keberadaan mikroba mampu membantu proses akuisisi fosfat oleh tanaman karena dalam bentuk terlarut.

Organisme dengan potensi pelarut fosfat meningkatkan ketersediaan fosfat terlarut dan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman dengan meningkatkan

efisiensi fiksasi nitrogen biologis atau meningkatkan ketersediaan elemen jejak lainnya seperti besi, seng dan dengan produksi regulator pemacu tumbuh tanaman. Sebagian besar tanaman diketahui dipengaruhi secara positif oleh asosiasi dengan mikroorganisme rizosfer dalam kondisi kekurangan fosfor. Asosiasi ini dapat menghasilkan peningkatan penyerapan fosfat yang tersedia atau membuat sumber fosfor yang tidak tersedia dapat diakses oleh tanaman. *Mikoriza Arbuskular* (AM) termasuk dalam kategori sebelumnya, sedangkan kategori terakhir mencakup banyak bakteri dan jamur yang mampu melarutkan mineral fosfat yang tidak larut. Mikroorganisme tanah meningkatkan akuisisi nutrisi tanaman. Mikroba terlibat dalam berbagai proses biologis termasuk transformasi nutrisi tanah yang tidak larut (Alori, Glick and Babalola, 2017). Beberapa mikroba mampu melarutkan dan memineralisasi fosfor tanah yang tidak larut untuk pertumbuhan tanaman. Selain pemupukan kimia, pelarutan dan mineralisasi P mikroba adalah satu-satunya cara yang mungkin untuk meningkatkan fosfor tersedia bagi tanaman. Di lingkungan alami banyak mikroorganisme di dalam tanah dan rizosfer efektif melepaskan fosfor dari total fosfor tanah melalui solubilisasi dan mineralisasi (Bhattacharyya and Jha, 2012).



Gambar 1.2: Absorpsi Berbagai Bentuk Fosfat Di Tanah Oleh Tanaman Pada Berbagai Kondisi Lingkungan (Ferraz Jardim et al., 2018).



Gambar 1.3: Strategi dan Mekanisme Penyerapan Fosfor (P) oleh Tanaman (Hallama et al., 2019)

Keterangan:

1. eksplorasi tanah melalui akar dan hifa mikoriza;
2. mobilisasi P anorganik (P_i) dan P organik (P_{org}) yang sedikit larut melalui eksudasi H^+/OH^- dan karboksilat;
3. mineralisasi P_{org} oleh *fosfatase*. Proses yang digerakkan oleh tanaman memiliki garis besar yang solid, aktivitas mikroba ditunjukkan dengan garis putus-putus.

Kelompok mikroorganisme ini disebut sebagai mikroorganisme pelarut fosfat (MPF). Banyak spesies jamur dan bakteri tanah mampu melarutkan fosfor in vitro dan beberapa di antaranya dapat memobilisasi fosfor pada tumbuhan (Zhu et al., 2011). MPF meningkatkan bioavailabilitas fosfor yang tidak larut dalam tanah untuk penggunaan tanaman. Mereka melarutkan fosfor anorganik (mineral) yang tidak larut dan mineralisasi fosfor organik yang tidak larut (Sharma et al., 2013). Mikroorganisme tanah yang toleran garam atau halofilik yang juga menunjukkan kemampuan untuk melarutkan fosfor yang tidak larut memfasilitasi pengembangan pertanian berbasis tanah salin-alkali. Inokulasi tanah atau tanaman dengan produksi pangan fosfat melalui peningkatan hasil pertanian karena melarutkan/memineralsasi mikroorganisme oleh karena itu lebih baik menggunakan pendekatan yang ramah lingkungan berupa strategi

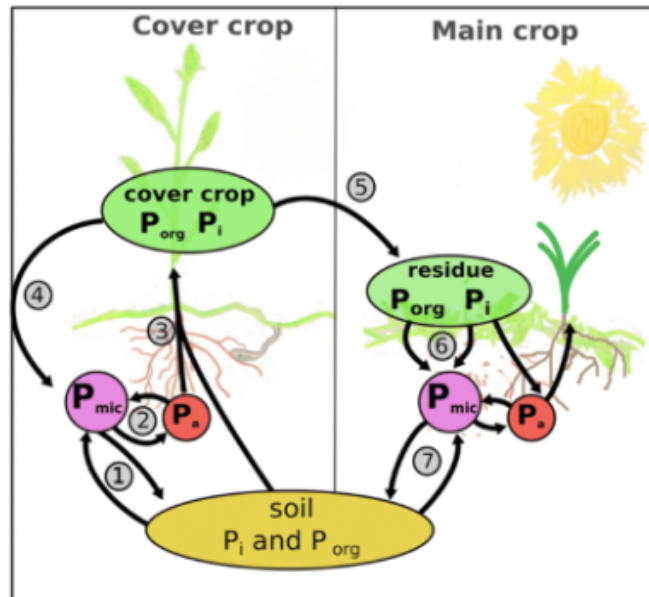
yang menjanjikan untuk peningkatan penyerapan tanaman dari fosfor sehingga mengurangi penggunaan pupuk kimia yang berdampak negatif terhadap lingkungan (Alori, Fawole and Afolayan, 2012).

Penggunaan PSM (mikroorganisme pelarut fosfat) yang efisien, membuka cakrawala baru untuk produktivitas tanaman yang lebih baik dan untuk kinerja hasil yang lebih baik tanpa memengaruhi kesehatan tanah. Mikroorganisme pelarut fosfat berperan penting dalam nutrisi tanaman melalui peningkatan serapan P oleh tanaman dan penggunaannya sebagai PGPR merupakan kontribusi penting untuk biofertilisasi tanaman pertanian. Meskipun beberapa strain bakteri seperti (*Pseudomonas* dan *Bacillus*) dan strain jamur (*Aspergillus* dan *Penicillium*) telah diidentifikasi sebagai MPF yang memiliki kinerja relatifnya dalam kondisi in situ tidak dapat diandalkan dan oleh karena itu diperlukan galur yang dimodifikasi secara genetik yang dapat menghasilkan pelarutan P yang lebih baik dan meningkatkan kesehatan tanaman (Ingle and Padole, 2017).

1.4 Kerangka Konsep Bagaimana Tanaman Memengaruhi Dinamika Fosfat di Tanah

Dinamika fosfat di tanah sangat dipengaruhi oleh proses mikoriza tanah-tanaman khususnya tanaman penutup tanah (Gambar 1.4), mekanisme yang paling banyak dipelajari adalah serapan langsung P_a oleh tanaman dan transfer P di dalam biomassa tanaman penutup tanah. Tanaman penutup tanah menyimpan P dalam jumlah besar, baik dengan biomassa yang tinggi dan konsentrasi P yang tinggi, secara metodologis relatif mudah untuk dinilai. Fosfor di dalam tanaman berbentuk biomassa tanaman terlindungi dari penyerapan ke dalam tanah (Groffman, Hendrix and Crossley, 1987) atau dapat mengalami kehilangan karena erosi dan pencucian, tetapi mineralisasi P harus selaras dengan kebutuhan tanaman utama. Beberapa tanaman penutup tanah bekerja melalui efek positif pada komunitas mikroba tanah (awal kolonisasi mikoriza, produksi enzim dan peningkatan mikroba P sebagai pelarut P untuk tanaman), meningkatkan kapasitas sistem tanaman-rhizobakteri untuk mengakses P. Terdapat juga juga modifikasi kimiawi dari

rizosfer, melalui perubahan pH, eksudasi karboksilat, atau pelepasan fosfat, seperti yang dijelaskan di atas. Mobilisasi P secara biokimia akan berpotensi paling besar pada tanah dengan kandungan P yang kurang tersedia, dengan syarat modifikasi kimiawi pada rizosfer tetap berlangsung hingga fase tanam utama. Semua proses ini terjadi secara simultan dengan tingkat kepentingan yang berbeda tergantung pada kombinasi agroekosistem dan manajemennya.



Gambar 1.4: Jalur Transfer Fosfor (P) dan Proses Tanaman-Mikroba yang Memengaruhi Ketersediaan P Melalui Tanaman Penutup Tanah (Hallama et al., 2019)

Keterangan:

- 1) Kumpulan P tanah dengan berbagai tingkat ketersediaan dilarutkan dan/atau termineralisasi dan diimobilisasi dalam biomassa mikroba. 2) Biomassa mikroba melepaskan P ke dalam larutan tanah yang 3) berakhir di tanaman melalui serapan akar atau mikoriza. Tanaman penutup tanah juga dapat memiliki kapasitas untuk menambang P dari pools P yang kurang tersedia atau menghasilkan modifikasi biokimia rizosfer untuk meningkatkan ketersediaan P. 4) Akar melepaskan rhizodeposit yang membentuk komunitas mikroba, yang pada akhirnya akan meningkatkan penambangan P. 5) P yang tersimpan dalam biomassa tanaman penutup dipindahkan ke tanaman utama melalui residu tanaman penutup, yang akan diuraikan oleh komunitas mikroba tanah. 6) Komunitas mikroba tanah (mikoriza) pada fase tanaman utama, yang

diperkuat oleh tanaman penutup, dapat memiliki kapasitas yang lebih besar untuk menambang P untuk tanaman utama (7).

Bab 2

Mikroorganisme Pelarut Fosfat dan Penyebarannya

2.1 Pendahuluan

Mikroorganisme pelarut fosfat merupakan mikroorganisme yang mempunyai kemampuan mengekstrak fosfat dari bentuk yang tidak larut menjadi bentuk yang tersedia bagi tanaman melalui sekresi asam-asam organik yang dihasilkan untuk melepaskan P dari kompleks jerapan (Hanafiah, et al 2009). Fosfor (P) termasuk unsur hara makro yang sangat penting untuk pertumbuhan tanaman, namun kandungannya di dalam tanaman sangat rendah dibanding nitrogen (N), kalium (K), dan kalsium (Ca). Tanaman menyerap P dari tanah dalam bentuk ion fosfat, terutama H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} yang terdapat dalam larutan tanah. Ion H_2PO_4^- lebih banyak dijumpai pada tanah yang lebih masam, sedangkan pada pH yang lebih tinggi (lebih besar dari 7) bentuk HPO_4^{2-} lebih dominan. Disamping ion-ion tersebut, tanaman dapat menyerap P dalam bentuk asam nukleat, fitin dan fosfohumat. Fosfat merupakan unsur hara makro esensial, bagi kehidupan tumbuhan dan yang terpenting pada biota tanah. Aktivitas mikroba tanah berpengaruh langsung terhadap ketersediaan unsur fosfat di dalam larutan tanah. Sebagian aktivitas mikroba tanah dapat melarutkan fosfat dari ikatan fosfat dari yang tak larut (melalui sekresi asam-asam organik) atau mineralisasi fosfat dari bentuk ikatan fosfat-organik menjadi fosfat-anorganik.

Fosfat terlarut digunakan oleh ⁴tanaman, fosfat anorganik yang terlarut juga digunakan mikroba untuk aktivitas dan pembentukan sel-sel baru, sehingga terjadi pengikatan (immobilisasi) fosfat. (Havlin et al., 1999).

⁶Unsur fosfat (P) adalah unsur esensial kedua setelah N yang berperan penting dalam fotosintesis dan perkembangan akar. Ketersediaan fosfat dalam tanah jarang yang melebihi 0,01% dari total P. Sebagian besar bentuk fosfat terikat oleh koloid tanah sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Tanah dengan kandungan organik rendah seperti Oksisols dan Ultisols yang banyak terdapat di Indonesia kandungan fosfat dalam organik bervariasi dari 20-80%, bahkan bisa kurang dari 20% tergantung tempat. Demikian juga kebanyakan lahan sawah di Indonesia telah jenuh fosfat. Fosfat tersebut tidak dapat dimanfaatkan semaksimal mungkin oleh tanaman, karena fosfat dalam bentuk P-terikat di dalam tanah, sehingga petani tetap melakukan pemupukan P di lahan sawah walaupun sudah terdapat kandungan P yang cukup memadai. Pada tanah-tanah masam, fosfat akan bersenyawa dalam bentuk-bentuk Al-P, Fe-P, dan *occluded*-P, sedangkan pada tanah-tanah alkali, fosfat akan bersenyawa dengan kalsium (Ca) sebagai Ca-P membentuk senyawa kompleks yang sukar larut.

⁵Kemampuan bakteri dan ⁶fungi pelarut P dalam melarutkan P berbeda-beda tergantung jenis strain. Untuk mengukur kemampuan kuantitatif pelarutan fosfat dari mikroorganisme, dilakukan dengan cara menumbuhkan biakan murni mikroorganisme tersebut pada media cair Pikovskaya. Sumber fosfat $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dapat diganti dengan fosfat alam atau senyawa fosfat tidak larut lainnya. Medium disterilisasi dalam autoklaf dan kemudian diisolasi dengan mikroorganisme pelarut fosfat. Selanjutnya biakan tersebut diinkubasi selama 3-7 hari. Kandungan P terlarut media cair tersebut diukur ⁵dengan menggunakan metode spektrofotometer (Gunadi et al., 1993). Umumnya mikroorganisme pelarut fosfat secara alami berada di tanah berkisar 0,1-0,5% dari total populasi mikroorganisme. Populasi mikroorganisme pelarut fosfat dari kelompok bakteri jauh lebih banyak dibandingkan dengan kelompok fungi. Jumlah populasi bakteri pelarut fosfat dapat mencapai 12 juta organisme per gram tanah sedangkan fungi pelarut fosfat hanya berkisar dua puluh ribu sampai dengan satu juta per gram tanah (Alexander, 1977).

7

2.2 Bakteri Pelarut Fosfat

Bakteri pelarut fosfat merupakan mikroba yang mampu melarutkan fosfat dari ikatan fosfat tak larut (melalui sekresi asam-asam organik) atau mineralisasi fosfat dari bentuk ikatan fosfat-organik menjadi fosfat-anorganik. Fosfat di dalam tanah secara alami terdapat dalam bentuk organik dan anorganik. Kedua macam bentuk tersebut merupakan bentuk fosfat yang tidak larut atau sedikit larut, sehingga ketersediaannya bagi biota tanah sangat terbatas. Mineral fosfat anorganik pada umumnya terikat sebagai $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (variscite) dan $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (strengite) pada tanah masam dan sebagai $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (trikalsium fosfat) pada tanah basa.

Asam-asam organik sangat berperan dalam pelarutan fosfat karena asam organik tersebut relatif kaya akan gugus-gugus fungsional karboksil ($-\text{COO}-$) dan hidroksil ($-\text{O}-$) yang bermuatan negatif sehingga memungkinkan untuk membentuk senyawa kompleks dengan ion (kation) logam yang biasa disebut chelate. Asam organik meng-chelate Al, Fe, atau Ca, dan mengakibatkan fosfat terlepas dari ikatan $\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, atau $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ sehingga meningkatkan kadar fosfat terlarut dalam tanah. Keadaan ini akan meningkatkan ketersediaan fosfat dalam larutan tanah. Pelarutan fosfat dari Al-P atau Fe-P pada tanah masam oleh asam organik yang dihasilkan bakteri pelarut fosfat. Beberapa jenis bakteri sangat efektif melarutkan fosfat dari batuan fosfat maupun residu fosfat dalam tanah. Sebagai contoh, *Bacillus megaterium* var. *phosphaticum* telah dibuat formulanya dalam bentuk inokulan phosphobacterin. Mendekatnya suatu unsur hara dari larutan tanah ke permukaan akar dapat terjadi melalui salah satu dari tiga proses, yaitu: (1) intersepsi akar (root interception), atau dengan pertukaran kontak (contact exchange); (2) difusi ion-ion dalam larutan tanah, dan (3) gerakan ion-ion oleh gerakan massa (mass movement) atau aliran massa (mass flow) larutan tanah. Pergerakan ion fosfat pada umumnya disebabkan oleh proses difusi, tetapi jika kandungan P larutan tanah cukup tinggi, maka proses aliran massa dapat berperan dalam transportasi tersebut. Ion yang sudah berada di permukaan akar akan menuju rongga luar akar (outer space) melalui proses difusi sederhana, jerapan pertukaran, dan kegiatan bahan pembawa (carrier). Selanjutnya ion memasuki rongga dalam akar (inter space) dengan melibatkan energi metabolisme, yang dikenal sebagai serapan aktif. Umumnya di dalam tanah ditemukan mikroba pelarut P anorganik sekitar 10^4 - 10^6 per gram tanah dan sebagian besar berada pada daerah perakaran. Penelitian dan pemanfaatan

mikroba pelarut P sudah banyak dilakukan. Mikroba Pelarut Fosfat ini telah banyak digunakan sebagai pupuk hayati.

Bakteri BPF merupakan bakteri tanah yang bersifat non patogen, sehingga termasuk dalam katagori bakteri pemacu pertumbuhan tanaman. Bakteri tersebut menghasilkan vitamin dan fitohormon yang dapat memperbaiki pertumbuhan akar tanaman serta meningkatkan serapan hara. Bakteri pelarut fosfat merupakan satu-satunya kelompok bakteri yang dapat melarutkan P yang terjerap permukaan oksida-oksida besi (Fe-P) dan almunium (Al-P). Bakteri tersebut berperan juga dalam transfer energi, penyusunan protein, koenzim, asam nukleat dan senyawa-senyawa metabolik lainnya yang dapat menambah aktivitas penyerapan P pada tumbuhan yang kekurangan. Pertumbuhan kelompok bakteri optimum pada pH sekitar netral dan meningkat seiring dengan meningkatnya pH tanah. Secara umum BPF yang dominan diisolasi dari rhizosfer tanah, sehingga termasuk kedalam golongan mikroorganisme aerob pembentuk spora, hidup pada kisaran pH 4-10,6.

Mikroorganisme pelarut fosfat terdiri atas bakteri, fungi dan sedikit aktinomiset. Mikroorganisme yang termasuk dalam kelompok bakteri pelarut fosfat antara lain *Pseudomonas striata*, *P. diminuta*, *P. fluorescens*, *P. cerevisia*, *P. aeruginosa*, *P. putida*, *P. denitrificans*, *P. rathonis*, *Bacillus polymyxa*, *B. laevolacticus*, *B. megatherium*, *Thiobacillus sp.*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Escherichia freundii*, *Cunninghamella*, *Brevibacterium spp.*, *Serratia spp.*, *Alcaligenes spp.*, *Achromobacter spp.*, dan *Thiobacillus sp.* Kelompok bakteri pelarut fosfat yang banyak terdapat pada lahan pertanian di Indonesia berasal dari genus *Enterobacter* dan *Mycobacterium* (Gunarto dan Nurhayati, 1994).

2.2.1 Jenis Bakteri Pelarut Fosfat

Alcaligenes sp., *Aerobacter aerogenes*, *Achromobacter sp.*, *Actinomadura oligospora*, *Agrobacterium sp.*, *Azospirillum brasilense*, *Bacillus sp.*, *Bacillus circulans*, *B. cereus*, *B. fusiformis*, *B. pumils*, *B. megaterium*, *B. mycoides*, *B. polymyxa*, *B. coagulans*, *B. chitinolyticus*, *B. subtilis*, *Bradyrhizobium sp.*, *Brevibacterium sp.*, *Citrobacter sp.*, *Pseudomonas sp.*, *P. putida*, *P. striata*, *P. fluorescens*, *P. calcis*, *Flavobacterium sp.*, *Nitrosomonas sp.*, *Erwinia sp.*, *Micrococcus sp.*, *Escherichia intermedia*, *Enterobacter asburiae*, *Serratia phosphoticum*, *Nitrobacter sp.*, *Thiobacillus ferrooxidans*, *T. thiooxidans*, *Rhizobium meliloti*, *Xanthomonas sp.*

2.3 Jamur Pelarut Fosfat

Jumlah mikroba pelarut fosfat baik bakteri ataupun fungi berbeda, perbedaan jumlah ini disebabkan kondisi tanah yang berbeda pula. Jamur pelarut fosfat adalah jamur yang mampu mengubah fosfat yang berada dalam tanah dari bentuk senyawa (sulit terlarut) menjadi bentuk ion (mudah terlarut) sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Jamur yang mampu untuk melarutkan fosfat biasanya berasal dari kelas Deuteromycetes. Jamur pelarut fosfat yang umum ditemukan dalam tanah yaitu jamur genus *Aspergillus* dan *Penicillium*. Fosfat dalam tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman untuk keperluan fotosintesis, pembentukan biji, bunga, buah, dan perkembangan akar.

MIKORIZA

Mikoriza merupakan fungi yang berasosiasi dengan system perakaran tumbuhan. Asosiasi ini bersifat mutualisme yaitu saling menguntungkan antara kedua simbion. Ada 7 jenis kelompok mikoriza yakni fungi mikoriza *arbuscular* (FMA), *ektomikoriza*, *endomikoriza*, *arbutoid mikoriza*, *monotropid mikoriza*, *ericoid mikoriza*, dan *orchid mikoriza*. Kelompok ini dibedakan berdasarkan jenis fungi (jamur), jenis tumbuhan sebagai asosiasi dan karakteristik yang terbentuk dari hasil asosiasi kedua simbion tersebut. Selain penggunaan mikroba pelarut fosfat, penggunaan mikoriza juga mampu meningkatkan unsur hara baik makro maupun mikro dan dapat menyerap unsur hara dalam bentuk terikat dan tidak tersedia bagi tanaman seperti P. Mikoriza mempunyai kemampuan untuk berasosiasi dengan hampir 90% jenis tanaman dan membantu dalam meningkatkan efisiensi penyerapan unsur hara terutama fosfor pada lahan marginal (Hanafiah, et al 2009). Inokulasi mikoriza dapat digunakan sebagai komponen strategi pengelolaan hara terpadu di mana aplikasi inokulum mikoriza komersial pada perlakuan pupuk NK menghasilkan pertumbuhan tanaman, berat gabah dan serapan P yang sebanding dengan perlakuan pemberian pupuk P (NPK).

2.3.1 Jenis Jamur Pelarut Fosfat

Fungi:

Fungi yang dapat melarutkan fosfat umumnya berasal dari kelompok *Deutromycetes* antara lain *Aspergillus niger*, *A. awamori*, *P. digitatum*, *P. bilaji*, *Fusarium*, *Sclerotium*, *Aspergillus niger*. Fungi pelarut fosfat yang dominan di tanah adalah *Penicillium* dan *Aspergillus*. Fungi pelarut fosfat yang

5 dominan ditemukan di tanah masam Indonesia ialah *Aspergillus niger* dan *Penicillium*. *Aspergillus awamori*, *A. niger*, *A. terreus*, *A. flavus*, *A. nidulans*, *A. foetidus*, *A. wentii*, *Fusarium oxysporum*, *Alternaria tenuis*, *Achrothcium* sp., *Penicillium digitatum*, *P. lilacinum*, *P. balaji*, *P. funiculosum*, *Cephalosporium* sp., *Cladosporium* sp., *Curvularia lunata*, *Cunninghamella*, *Candida* sp., *Chaetomium globosum*, *Humicola insolens*, *Humicola lanuginosa*, *Helminthosporium* sp., *Paecilomyces fusisporous*, *Pythium* sp., *Phoma* sp., *Populospora mytilina*, *Myrothecium roridum*, *Mortierella* sp., *Micromonospora* sp., *Oideodendron* sp., *Rhizoctonia solani*, *Rhizopus* sp., *Mucor* sp., *Trichoderma viridae*, *Torula thermophila*, *Schwanniomyces occidentalis*, *Sclerotium rolfii*.

Actinomycetes:

Actinomyces sp., *Streptomyces* sp.

Cyanobacteria:

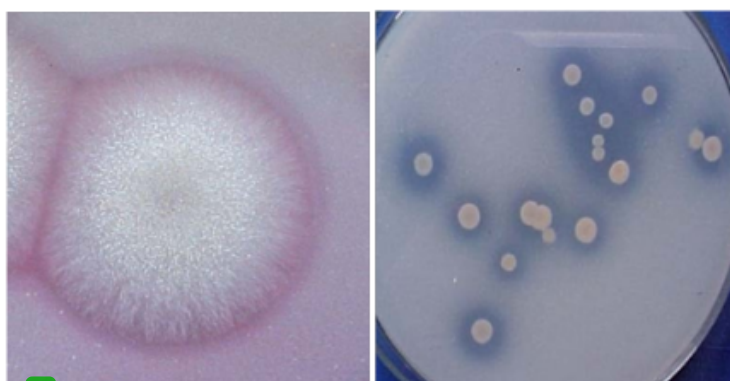
Anabaena sp., *Calothrix braunii*, *Nostoc* sp., *Scytonema* sp. (Goenadi et al., 1993).

2.3.2 Isolasi Mikroba Pelarut Fosfat

4 Media selektif Mikroba Pelarut Fosfat (MPF) yang biasa digunakan untuk isolasi adalah media agar *Pikovskaya* atau NBRIP. MPF yang tumbuh pada media ini akan membentuk koloni yang di sekelilingnya terdapat daerah bening (zona bening). Daerah bening ini terbentuk karena adanya pelarutan fosfat dari sumber fosfat sukar larut yang ada dalam media oleh asam-asam organik yang dihasilkan koloni mikroba. Waktu yang diperlukan untuk pertumbuhan, warna, dan besar koloni serta luas daerah bening berbeda-beda tergantung dari jenis MPF. Akan tetapi pada dasarnya semakin luas dan semakin jernih. Isolasi bakteri pelarut fosfat menggunakan medium selektif differensial (merangsang pertumbuhan mikroba diinginkan, dan menghambat pertumbuhan mikroba yang tidak diinginkan, serta menampilkan morfologi koloni yang spesifik dari mikroba yang diinginkan). Identifikasi dilakukan pada Mikroba Pelarut Fosfat (MPF) yang mampu membentuk holozona (zona bening). Fungi yang membentuk holozona pada media *Pikovskaya* kemudian dimurnikan hingga satu koloni per media. Identifikasi bakteri dan fungi dilakukan dengan cara yang sama yaitu secara makroskopis dan mikroskopis. Pengamatan mikroskopis fungi dilakukan dengan melihat ciri hifa serta ciri

konidianya. Setelah dilakukan isolasi, diperoleh isolat fungi, yang selanjutnya dilakukan identifikasi terhadap ke isolat yang diperoleh.

Berbagai media pertumbuhan sedang digunakan di laboratorium untuk isolasi dan karakterisasi PSM. Pendekatan yang dapat diandalkan yang digunakan untuk skrining awal dan isolasi PSM potensial pertama kali dijelaskan oleh Pikovskaya (Pikovskaya 1948). Ia bekerja dengan melapisi 0,1 mL atau 1 mL suspensi tanah rhizosfer yang diencerkan secara serial pada media Pikovskaya atau NBRIP yang disterilkan yang dilengkapi dengan trikalsium fosfat/hidroksiapatit yang tidak larut sebagai satu-satunya sumber P. Koloni yang membentuk zona halo bening di sekitar setiap koloni disaring sebagai PSM setelah inkubasi pada suhu yang sesuai. Kultur murni dari koloni tersebut diproses lebih lanjut untuk identifikasi melalui karakterisasi biokimia dan molekuler.



Gambar 2.1: Mikroorganisme Pelarut Fosfat yang Membentuk Zona Bening (Rohani, et al 2006).

Sumber fosfat yang dapat digunakan dalam medium agar antara lain $\text{Ca}(\text{PO}_4)_3$, FePO_4 , AlPO_4 , apatit, fosfat alam, atau senyawa fosfat tidak larut yang lainnya sebagai satu-satunya sumber fosfat misalnya $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ yang disuspensikan ke dalam medium agar. Kemampuan tiap mikroorganisme.

Media Pikovskaya atau NBRIP bisa dimodifikasi sesuai dengan tujuan isolasi. Sebagai contoh, untuk memperoleh strain MPF yang mampu melarutkan fosfat dari Al-P maka pada media digunakan AlPO_4 sebagai sumber fosfat. Dengan cara tersebut akan diperoleh isolat-isolat MPF yang mempunyai potensi untuk dapat dikembangkan pada tanah masam dengan kadar Al relatif tinggi. Demikian pula jika yang dipakai sebagai sumber fosfat adalah FePO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ atau batuan fosfat lainnya (terdapat berbagai macam batuan fosfat:

4

$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan lainnya), maka koloni yang tumbuh merupakan koloni MPF yang mampu memanfaatkan fosfat dari senyawa sumber fosfat tersebut. Hal yang perlu diperhatikan di dalam memodifikasi sumber fosfat pada media Pikovskaya atau NBRIP adalah kadar fosfat pengganti sebaiknya dibuat setara dengan kadar fosfat pada pemakaian 5 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ dalam 1 L media.

Alat

1. Neraca analitik ketelitian dua desimal
2. Labu Erlenmeyer 1 L
3. Cawan Petri steril
4. Tabung reaksi steril
5. Pipet mikro 1 mL

Bahan

1. Media agar Pikovskaya (Subba-Rao 1981)
2. Timbang bahan kimia berikut ini masing-masing seberat: 10 g glukosa; 5 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ bisa diganti dengan AlPO_4 , FePO_4 , atau sumber P lainnya); 0,5 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$; 0,1 g $\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; sedikit MnSO_4 ; sedikit FeSO_4 ; 0,5 g ekstrak ragi; dan 15 g agar. Larutkan dalam akuades sampai volume 1 L, lalu pH diatur mencapai 7,0.
3. Media NBRIP (Patel et al. 2022)
4. Timbang bahan kimia berikut ini masing-masing seberat 10 g Glukosa, 0,1 g $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, 0,1 g KCl, 0,25g $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0,25 g $\text{MgC}_2\text{O}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, dan 5,0 g $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ atau 5,0 g hidroksiapatit. Larutkan dalam akuades sampai volume 1 L, lalu pH diatur mencapai 7,0.
5. Sterilisasi bahan media tersebut dengan autoklaf pada tekanan 0,1 MPa dan suhu 121°C selama 20 menit.
6. Keluarkan media yang telah disterilkan dan dinginkan sampai suhu mencapai $\pm 45\text{-}50^\circ\text{C}$ atau hangat-hangat kuku.
7. Tuang secara aseptik sebagian media ke dalam cawan-Petri steril ($\pm 20\text{ml}$ media pada setiap cawan Petri), goyang/geser supaya permukaan media merata, dan diamkan sampai beku. Media ini merupakan media untuk penanaman/isolasi MPF.

8. ⁴ Tuang secara aseptik sebagian media ke dalam tabung reaksi steril, ($\pm 5-15$ mL media setiap tabung tergantung dari ukuran tabung reaksi), letakkan pada posisi miring dengan sudut 30° C dan diamkan sampai dingin. Media ini merupakan media agar miring untuk menyimpan biakan murni MPF.
9. ⁴ Biosida (pilih salah satu):
 - a. Fungisida: Brilliant green (1,25 ppm) Pentachloronetrobenzene: Larutkan 0,5 g pentachloronetrobenzene ke dalam 100 mL aseton, untuk 40 mL media.
 - b. Bakterisida Karbenisilin (50 ppm) Tetrasiklin (50 ppm).
10. Larutkan 1 g contoh tanah dari rhizosfer ⁴ atau 1 mL suspensi contoh akar yang telah disterilisasi permukaan ke dalam 9 mL akuades steril.
11. Buat deret pengenceran 10-1, 10-2, 10-3, dan 10-4.
12. Tambahkan biosida (fungisida untuk isolasi bakteri atau bakterisida untuk isolasi fungi) pada setiap deret pengenceran larutan tersebut.
13. Pipet masing-masing 1 mL larutan dari pengenceran 10-2, 10-3, dan 10-4 dan secara aseptik tuang ke dalam cawan Petri yang berisi media agar Pikovskaya atau NBRIP, lalu cawan Petri goyang digeser ke kanan dan ke kiri atau digeser memutar sampai larutan merata di ⁴ luruh permukaan media.
14. Beri label pada setiap cawan Petri sesuai dengan besar pengenceran, selanjutnya inkubasi pada suhu kamar selama 3-6 hari.
15. Amati pertumbuhan koloni Mikroba Pelarut Fosfat setelah 3-6 hari inkubasi, pilih koloni yang mempunyai zona bening (halozone) paling lebar dan paling jernih untuk diisolasi. Secara aseptik ambil koloni yang telah dipilih dengan ose steril, lalu goreskan pada media agar, dan inkubasi pada suhu kamar (28-30°C) selama 3-6 hari.
16. Koloni yang tumbuh terpisah, ambil secara aseptik dengan ose dan goreskan ke permukaan media agar miring Pikovskaya atau NBRIP.
17. Beri kode atau nomor isolat pada setiap isolat MPF dan simpan di dalam alat pendingin (refrigerator) pada suhu 5°C. Tabung ini berisi biakan murni isolat Mikroba Pelarut Fosfat yang digunakan sebagai sumber inokulan.

Bab 3

Mekanisme Pelarutan Fosfat

3.1 Pendahuluan

Fosfat merupakan bagian dari unsur hara primer yang memegang peran penting dalam produksi tanaman (Fahmi, Radjagukguk and Purwanto, 2013). Fosfat dalam kimia memiliki nomor atom 15 dan memiliki lambang P. Karena bagian unsur hara penting dan utama dalam tanaman maka fosfat termasuk unsur hara esensial (Basuki et al., 2015; Basuki, 2020; Basuki and Winarso, 2021; Soetriono et al., 2023). Dalam pertumbuhan tanaman, fosfat dibutuhkan dalam jumlah yang besar agar tanaman dapat tumbuh secara normal dan optimal. Fungsi fosfat beragam mulai dari proses fotosintesis, energi, respirasi, pembelahan sel(Subhan, 2004; Basuki and Sari, 2020). Fosfat ditemukan dalam bagian tubuh tanaman terutama di bagian pusat pertumbuhan. Tabel 3.1 menunjukkan bahwa tiap tanaman membutuhkan fosfat yang berbeda untuk dapat menghasilkan produksi yang optimal dalam luasan hektar.

Tabel 3.1: Kebutuhan Unsur Hara Fosfat Pada Tanaman

No	Jenis Tanaman	Kebutuhan Fosfat dalam P ₂ O ₅ Kg/ha
1	Padi	18-30
2	Jagung	18-50
3	Kedelai	18
4	Bawang merah/putih	54-65

5	Melon/semangka	90
6	Cabai	54-65
7	Tomat	54-65
8	Jeruk	106
9	Jambu	106
10	Mangga	106
11	Kentang	72
12	Tebu	36-72
13	Kakao	72
14	Kopi	72-90
15	Lada	216



Gambar 3.1: Gejala Defisiensi Kekurangan Unsur Hara Fosfor

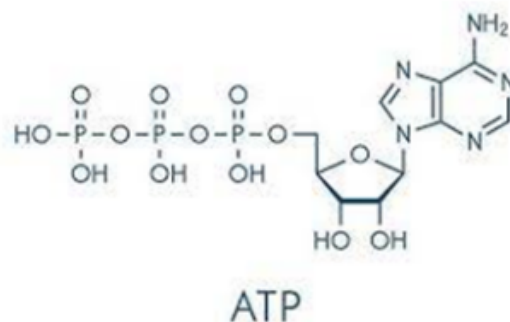
Tanaman yang mengalami kekurangan fosfat akan menurunkan produktivitas (Basuki et al., 2022). Kekurangan fosfat ditanaman secara visual ditunjukkan dengan warna daun ungu dibagian tepi daun. Fosfor bersifat mobile, sehingga bila kekurangan unsur hara fosfor pada tanaman akan ditunjukkan pada jaringan daun tua dan selanjutnya bila berlanjut ke defisiensi baru ditunjukkan pada daun muda. Ada beberapa gejala yang ditunjukkan oleh tanaman selain warna daun ungu di antaranya pertumbuhan tanaman terlambat dari normal sehingga tanaman kerdil, akar tanaman tidak berkembang baik sehingga berpengaruh pada serapan nutrisi lain, masa generatif lebih lama dan berakibat produksi yang tidak tercapai (Basuki et al., 2023).

Tanaman selain kekurangan unsur hara fosfor dapat juga kelebihan dan akan berpengaruh terhadap metabolisme pada tanaman. Tanaman yang kelebihan unsur hara fosfor akan menunjukkan gejala terutama dalam penghambatan penyerapan unsur hara lain sehingga unsur hara lain akan terjadi defisiensi seperti unsur hara Fe dan Zn. Unsur hara Fe dan Zn merupakan unsur hara antagonis sehingga unsur hara ini pertama yang terdampak bila tanaman kelebihan unsur hara fosfat.

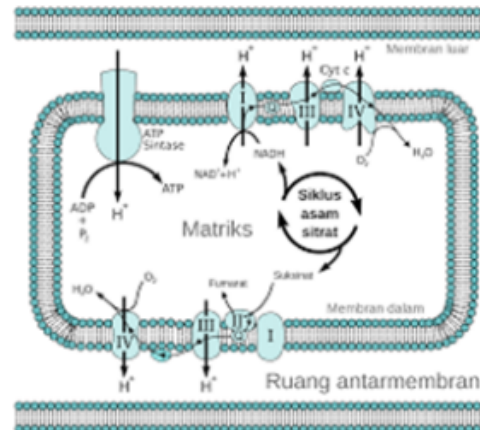
3.2 Fungsi dan Hambatan Fosfat

Fosfat memiliki banyak fungsi dalam tanaman di antaranya:

1. Menyusun pembentukan albumin,
2. membantu dalam pembelahan sel,
3. menyusun pembentukan generatif terutama pembentukan bunga, kulit buah, buah, dan biji.
4. Mempercepat dalam pematangan buah,
5. bersama unsur hara kalium (K) dalam menyusun batang sehingga dapat kuat,
6. menyusun perkembangan akar,
7. menyusun dalam pembentukan RNA dan DNA,
8. mengatur dalam metabolisme karbohidrat,
9. menyimpan dan menyalurkan energi keseluruhan tubuh tanaman seperti ATP,



Gambar 3.2: Adenosin Tripospat (ATP)



Gambar 3.3: Fosforosasi Oksidatif

10. menyusun asam amino dalam tanaman,
11. membentuk ketahanan tanaman dalam menangkal penyakit seperti Fusarium.

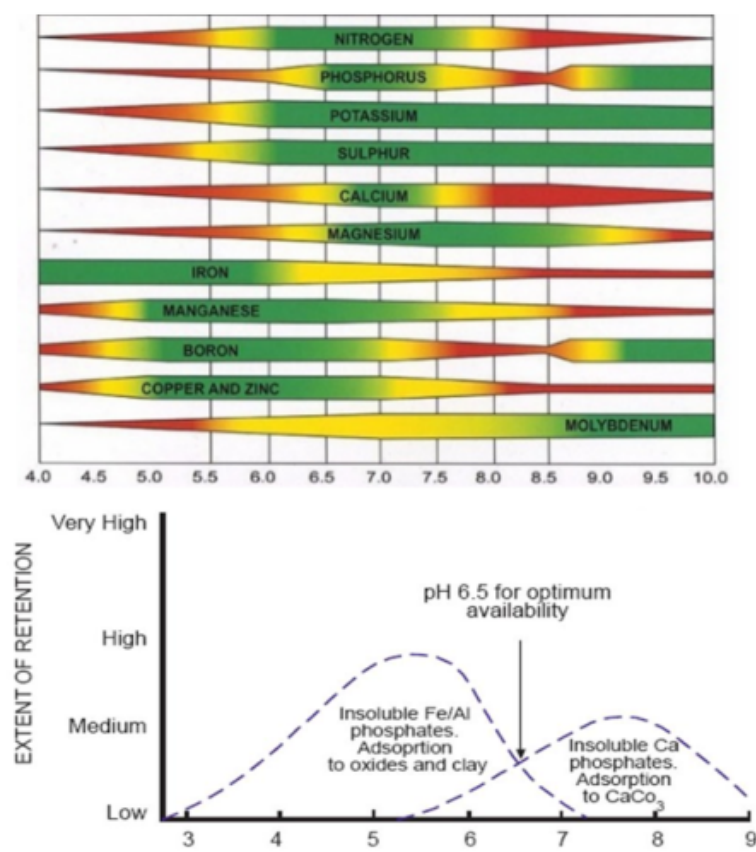


Gambar 3.4: Layu Fusarium (Karamina et al., 2020)

Unsur hara fosfat memiliki siklus yang unik di mana fosfat tersedia di dalam tanah dalam rentang pH tanah 6,5-7,5. pH dibawah 6,5, dan diatas 7,5 dalam bentuk tidak tersedia karena terikat kuat oleh kation Al^{3+} , Mn^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , dan Mg^{2+} .

1. pH tanah $>7,5$, pospta akan terikat kuat oleh calsium (Ca), dam magnesium (Mg) membentuk kalsium fosfat ($CaPO_4$) dan magnesium fosfat ($MgPO_4$).
2. pH tanah $<6,5$, fosfat terikat kuat oleh mineral liat, oksida besi (Fe), aluminium (Al), dan mangan (mn).

Tanaman menyerap unsur hara pospat dalam bentuk ion fospat HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , PO_4^{3-} . Pospat yang diserap oleh tanaman berkisar 0,1-0,5% dari bobot berat kering. Kondisi tersebut juga tergantung oleh jenis tanaman, spesies, perkembangan, dan pertumbuhan tanaman et al, 2019; Basuki et al., 2021; Basuki, Sari and Tanzil, 2022; Basuki et al, 2022; Sari et al., 2023).



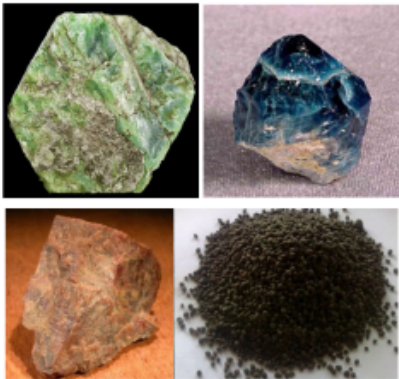
Gambar 3.5: Hubungan ketersediaan hara fosfat dengan pH tanah

3.3 Sumber Fosfat

Fosfat sebagai sumber unsur hara bagi tanaman berasal dari dekomposisi atau mineralisasi pelapukan mineral tanah dan bahan organik. Beberapa sumber unsur hara fosfat yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi tanaman seperti pada Tabel 3.2. dan sebaran sumber fosfat tersebar di seluruh Indonesia (Gambar 3.6).

Tabel 3.2: Sumber Fosfat

No	Sumber Fosfat	Kandungan/rumus kimia	Keterangan
1	Calcium phosphates	CaHPO_4	Tidak Tersedia
2	Aluminium phosphate	AlPO_4	Tidak Tersedia
3	Iron phosphate	FePO_4	Tidak Tersedia
4	Phosphate	HPO_4^{2-} , H_2PO_4^- , PO_4^{3-}	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman
5	fluor apatit	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	Tidak Tersedia
6	Vivianite	$\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$	Tidak Tersedia
7	Phosphorit	-	Fosfat sedimenter (marin)
8	Organik P	-	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman dan organisme
9	Guano Kelelawar	-	Dapat digunakan dan tersedia untuk tanaman dan organisme



Gambar 3.6: Batuan Fosfat Apatit, Monasik, dan Guano Kelelawar



Gambar 3.7: Sebaran FOSFAT DI INDONESIA

Tabel 3.3: Wilayah penghasil pospat alam

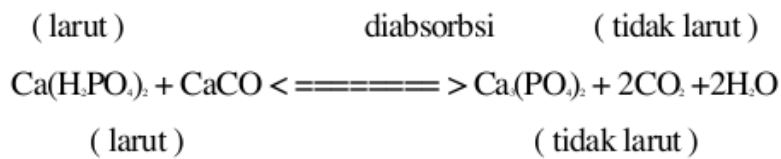
No	Propinsi	Potensi (ton)	Kadar P ₂ O ₅ (%)
1	Jawa Barat (Kabupaten ciamis Kecamatan Sidomulih Desa Pamarican)	2.000.000	15-39
2	Jawa Barat (Kabupaten ciamis Kecamatan Padaherang Desa Padaherang)	425.000	18-33
3	Jawa tengah (Kabupaten Kebumen Kecamatan Ayah Desa Karangbolong, Gombang, Gua Banteng, Gebluk	250.000	10-28, 119 gua fosfat
4	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Omben Desa Tambak)	3.000.000	23,26
5	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Sokobanah Desa Bira Timur)	2.250.000	43,14
6	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Sampang Desa Dalpenan)	4.500.000	9,79-27,78
7	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Jrengik Desa Buker)	1.500.000	29,01
8	Jawa Timur (Kabupaten Sampang Kecamatan Jrengik Desa Taman)	1.500.000	4,19
9	Kalimantan Selatan (Kabupaten Tapin Kecamatan Bungur Desa Gua Ratau	110.100	7,31-12,19
10	Aceh (Kabupaten Aceh Besar Kecamatan Arongan Lambalek Desa Gua Gleteumiba)	13.000	6,25-27,8 Gua Fosfat

3.4 Fiksasi Fosfat

Fosfat dalam tanah baik dari fosfat tanah sendiri maupun pupuk tidak tersedia bagi tanaman karena terjadi fiksasi. Adapun fiksasi fosfat baik pada tanah masam maupun basah sebagai berikut:

3.4.1 Fiksasi Fosfat pada Tanah Dengan Kondisi Masam

- 1. Fosfat dalam bentuk HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$, PO_4^{3-} yang larut akan terendapkan oleh ion Fe, Al, maupun Mn membentuk tidak larut $Al(OH)(H_2PO_4)_2$. Bila pH tanah masam-sangat masam dan konsentrasi Fe, Al, Mn

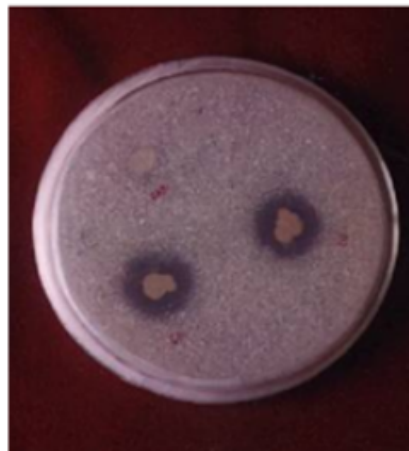


3.5 Pelarutan Mineral Fosfat

Fosfat sangat penting dalam siklus hidup tanaman. Dalam proses pelarutan fosfat selain dipengaruhi oleh kondisi pH juga di pengaruhi oleh faktor lain seperti keberadaan organisme dalam tanah. organisme yang mampu melatutkan fosfat dari tidak tersedia menjadi tersedia terbagi atas golongan jamur dan bakteri. Golongan jamur yang mampu melarutkan fosfat seperti *Arpergillus*, *Penicillium*, *mikoriza*. Golongan bakteri yang mampu melarutkan fosfat menjadi tersecia contohnya *Bacillus*, *Rhizobium*, dan *Pseudomonas*.

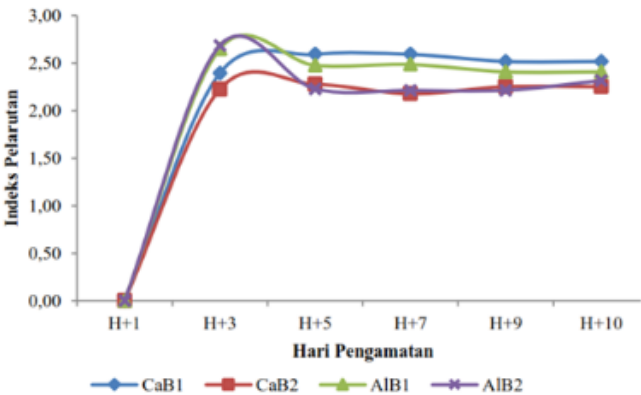
Mekanisme pelarutan fosfat oleh organisme melalui beberapa cara di antaranya:

1. Merubah fosfat tidak tersedia dengan cara kelarutan secara anorganik
2. Melepaskan orthophosphat dari mineralisasi senyawa fosfat organik.
3. Senyawa fosfat anorganik hasil yang dirubah dan menyediakan anion ke protoplasma sel secara immobilisasi.
4. Mengoksidasi dan mereduksi sevyawa fosfat anorganik.



Gambar 3.8: Pelarutan Fosfat

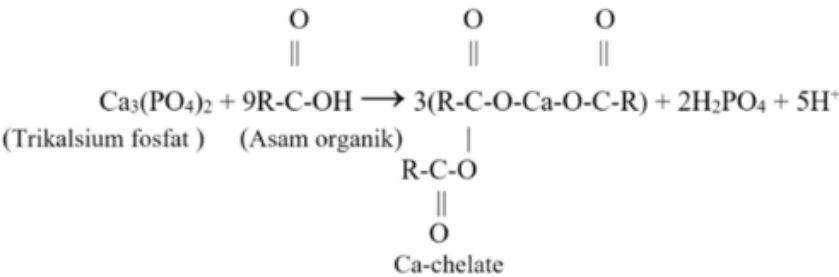
Bakteri mampu melarutkan fosfat tidak tersedia seperti FePO_4 (2,1-7,1%), $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (3,2-9,6%), glisero-fosfat (3,6-13,2%), lesitin (5,7-21,2%) dan tepung tulang (14,22%). Sedangkan jamur mampu melarutkan fosfat $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (25,9-39,0%). *Arpergillus* mampu menghasilkan asam organik seperti asam sitrat yang mampu melarutkan Ca-fosfat. Asam organik yang dihasilkan oleh *Arpergillus* terbesar dengan nilai 1,835 gram per liter.



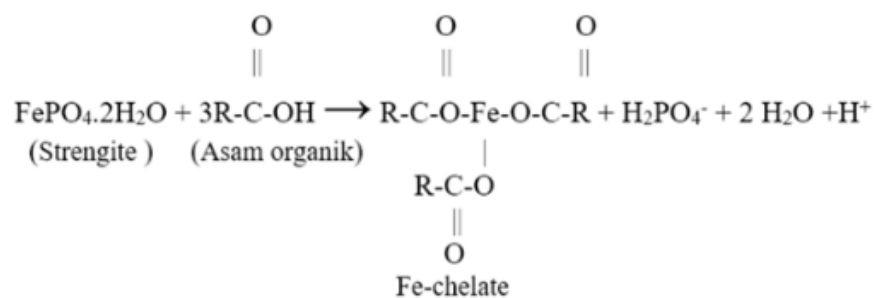
Gambar 3.9: Pelarutan Mineral Fosfat oleh Bakteri

Keterangan: Ca = $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$; Al = AlPO_4 ; B1= *Pseudomonas* sp; B2 = *Bacillus valezensis*

Pelarutan oleh bakteri dalam kurun waktu 10 hari mampu meningkatkan indek pelarutasn sampai 2-3 kali. Adapun rekasi dalam pelarutan fosfta tidak tersedia menjadi tersedia sebagai berikut:



Gambar 3.10: Mekanisme Asam Organik Pelarutan Fosfat dari Trikalsium fosfat



Gambar 3.11: Mekanisme Asam Organik Pelarutan Fosfat dari Strengite

Bab 4

Mikroba Pelarut Fosfat sebagai Pemacu Tumbuh Tanaman

4.1 Pendahuluan

Kondisi kehidupan organisme di alam kaya dengan keragaman. Keragaman organisme dalam tanah misalnya dapat ditunjukkan berdasarkan ukuran organismenya yaitu makro, meso dan mikro. Selain itu bentuk keragaman lainnya ialah berdasarkan jenis organisme dalam tanah yaitu bakteri, fungi, virus, amoeba, nematoda, protozoa dan masih banyak lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa begitu kayanya kehidupan organisme dalam tanah. Berdasarkan kekayaan keragaman tersebut, organisme atau biota tanah perlu mendapatkan perhatian lebih oleh berbagai sektor karena peran dari pada organisme tanah telah banyak menunjukkan hubungan positif antara organisme tanah dan kesehatan lingkungan serta manfaatnya terhadap sektor pertanian.

Banyak peneliti seperti ahli ekologi, mikroba, geologi, ahli biogeokimia, dan ahli agronomi, bahkan ekonom kini mulai mempertimbangkan isu yang berkaitan dengan pengaruh tanah dan biotanya, baik secara lokal maupun global. Kondisi alam saat ini yaitu erosi, polusi udara, penggunaan tanaman dan mikroorganisme yang dimodifikasi secara genetik, perubahan penggunaan

lahan dan perubahan struktur tanah adalah fenomena yang memengaruhi keberlanjutan kelestarian lingkungan.

Perubahan ini memiliki dampak pada siklus hidrologi, hilangnya karbon dan hilangnya kesuburan tanah untuk kebutuhan pangan, pertanian dan masyarakat secara luas. Fenomena ini menunjukkan betapa sedikitnya pengetahuan dan perhatian para ilmuwan tentang hubungan antara keanekaragaman hayati tanah terhadap fungsi ekosistemnya. Selain itu perlu peningkatan peran peneliti untuk dapat melakukan eksperimen yang berkaitan dengan manfaat organisme dalam tanah untuk perubahan lebih baik dimasa depan serta peran yang lebih luas yakni memengaruhi interaksi antara manusia dengan tanah dan kehidupannya.

Lebih lanjut peran biota tanah dalam menjaga kestabilan pangan dengan membantu dalam meningkatkan ketersediaan unsur hara dalam tanah. Berdasarkan fungsinya biota tanah berperan sebagai perekayasa ekosistem, dekomposer, dan pelarut unsur hara seperti bakteri nitrifikasi dan mikroba pelarut posfat. Perekayasa ekosistem ialah biota tanah berjenis semut, rayap, dan cacing tanah. Dekomposer berupa mikroorganisme pendekomposer yaitu fungi, insek (serangga) dan organisme perombak bahan organik lainnya. Dekomposer berperan dalam pemecahan fisik dan transformasi biokimia dari molekul organik kompleks menjadi molekul organik dan anorganik yang lebih sederhana. Sedangkan mikroorganisme pelarut unsur hara yaitu bakteri nitrifikasi dan pelarut posfat berperan dalam mengubah senyawa-senyawa nitrogen dan posfat yang tidak tersedia menjadi tersedia bagi tanaman.

4.2 Habitat Mikroba Pelarut Posfat

Semua ekosistem kehidupan baik di darat atau di air mempunyai habitat yang memiliki karakteristik tertentu. Lingkungan menggambarkan karakteristik makhluk hidup yang tinggal pada wilayah tersebut. Burung pelatuk, kalkun, dan beruang berhabitat di hutan sub tropis. Monyet ekor panjang, anoa, burung maleo dan badak bercula satu hidup di habitat hutan hujan tropis. Begitu juga kehidupan organisme dalam tanah memiliki struktur habitatnya dalam tanah. Setiap individu, populasi, dan komunitas beraktivitas sebagian besar ditentukan oleh bentuk morfologi tempat mereka hidup.

Tanah adalah habitat dengan keanekaragaman hayati yang luar biasa, namun organisme penghuni tanah hanya mendapat sedikit perhatian dalam bidang konservasi terkhusus biologi tanahnya. Karena kesulitan yang dihadapi dalam mempelajari biota tanah, dan taksonominya pada penelitian konservasi. Keanekaragaman hayati tanah sepenuhnya tidak dipahami dengan baik, dan organisme penghuni tanah jarang menjadi tokoh utama dalam bidang konservasi. Biogeografi biota tanah sangat berbeda dari tumbuhan atau hewan di atas permukaan tanah, dan keragaman taksonomi dan fungsional penghuni tanah memungkinkan mereka memiliki banyak efek ekologis pada organisme di atas permukaan tanah.

Keanekaragaman hayati tanah mendukung banyaknya layanan ekosistem penting yang mendukung tanaman dan hewan yang biasanya menjadi sasaran upaya konservasi (gambar 4.1.).



Gambar 4.1: Keragaman Biota Pada Habitat Di Bawah Permukaan Tanah (Clermont-Dauphin et al., 2014)

Struktur dan aktivitas komunitas mikroba tanah sangat bergantung pada status habitat tanahnya. Di dalam habitatnya, organisme tanah melakukan segala aktivitasnya seperti makan, bernafas, berkompetisi dengan mikroorganisme lainnya, bersinergi, dan merespon perubahan yang terjadi pada lingkungannya. Mayoritas komunitas mikroba tidak aktif pada waktu tertentu di sebagian besar habitat tanah, hal ini dilakukan sebagai bentuk respon pada kelompok mikroba tertentu agar dapat menghasilkan hubungan saling menguntungkan (Yang et al., 2018). Habitat tanah mungkin paling cocok di gambarkan sebagai matriks kompleks dengan pori-pori dan agregat tanah dengan ukuran yang bervariasi

(Erktan et al., 2020). Bakteri dan fungi tertentu cenderung berkumpul di tanah yang berdekatan dengan akar tanaman (rizosfer), di mana mereka dapat memakan gula yang dipancarkan akar tanaman atau benar-benar secara fisik berasosiasi dengan sistem akar tanaman dan bertukar gula dan nutrisi dengan hubungan mutualistik (mikoriza).



Gambar 4.2: Sebaran Global Habitat Biota Tanah, Fungsi Ekosistemnya dan Biomassanya. a, b Sebaran Global Biota Tanah; c, d Sebaran Fungsi Ekosistem Biota Dalam Tanah; e Sebaran Biomassa dan f Diagram Persentase (Guerra et al., 2020)

Bentuk kekayaan taksonomi, fungsi ekosistemnya dan juga biomassanya dalam tanah dapat dilihat dari gambar 4.2 yaitu sebaran habitat biota tanah yang dilihat secara global. Ekosistem tanah pada dasarnya sangat heterogen pada skala lokal. Memiliki jumlah situs pengambilan sampel yang kecil dan tersebar untuk fungsi tanah dan taksonomi biota tanah membuat kekuatan analisis global untuk mengevaluasi hubungan makroekologi antara keanekaragaman hayati tanah dan fungsi ekosistem menjadi terbatas, terutama pada siklus hara dan produktivitas sekunder, yang memiliki kekuatan yang kuat. Faktanya, dari empat fungsi yang dinilai di sini, ada konsentrasi studi yang signifikan yaitu pada respirasi tanah, terhitung 78,8% (N = 2616) dari fungsi biota tanah lainnya yaitu dekomposisi, daur hara, dan infiltrasi air dalam tanah (Gambar 4.2.d).

Secara global, data keanekaragaman hayati tanah dan fungsi ekosistem tidak terdistribusi secara merata. Bakteri (N = 3453), fungi (N = 1687), dan Formicoidea (N = 3024; yang bersama-sama memusatkan 48,8% dari semua catatan keanekaragaman hayati tanah) memiliki distribusi yang relatif besar

dan seimbang secara geografis jika dibandingkan dengan Rotifera ($N = 41$), Collembola ($N = 27$), dan Acari ($N = 10$), yang memiliki jumlah lokasi pengambilan sampel yang jauh lebih rendah dan distribusi yang lebih tersebar (Gambar 4.2.b).

Distribusi dan ketersediaan data untuk studi makroekologi organisme tanah telah berubah secara dramatis selama setahun terakhir, dengan upaya mensintesis studi skala lokal menjadi inisiatif skala besar. Jadi, dalam kasus bakteri, fungi, Nematoda, dan Oligochaeta (termasuk cacing tanah dan enchytraeids), jumlah lokasi pengambilan sampel yang relatif tinggi mencerminkan upaya masyarakat untuk mengumpulkan data penyebaran berdasarkan koleksi dari berbagai riset. Dalam kasus Formicoidea, ketersediaan data mencerminkan hasil dari inisiatif pengambilan sampel secara global yang sistematis. Namun, sebagian besar analisis yang dibuat sejauh ini tidak memiliki representasi yang seimbang dari ekosistem dunia dengan sebagian besar pengamatan terkonsentrasi pada sistem beriklim sedang.

4.3 Potensi Mikroba Pelarut Posfat sebagai Pemacu Tumbuh Tanaman

Fosfor adalah salah satu unsur logam paling melimpah yang ditemukan di kerak bumi dan terdapat di tanah baik dalam bentuk organik maupun anorganik. Meskipun hadir dalam konsentrasi tinggi, hanya 0,1% dari total P yang tersedia untuk tanaman karena kelarutannya yang buruk dan fiksasinya dengan unsur logam lain di dalam tanah seperti Ca, Al, Fe untuk membentuk kalsium fosfat, aluminium fosfat dan besi fosfat dan dengan demikian menjadi tidak tersedia bagi tanaman (Gao et al., 2020; Sosena dan Sheleme, 2020). Penggunaan pupuk P berbasis kimia yang luar biasa memiliki dampak jangka panjang terhadap lingkungan yaitu eutrofikasi, menipisnya kesuburan tanah baik sifat fisik, kimia dan biologi (Bai et al., 2020; Wang, Geng dan Liang, 2020). Kondisi ini membuat para akademisi atau peneliti terpacu untuk menemukan pendekatan yang bersifat berkelanjutan untuk ketersediaan P yang efisien dan efektif di pertanian untuk memenuhi permintaan pangan yang terus meningkat.

PSM yaitu Phosphate Solubilizing Microbes atau mikroorganisme pelarut posfat ialah penggunaan mikroba yang efisien dalam melarutkan posfat dalam tanah membuka cakrawala baru untuk produktivitas tanaman yang lebih baik dan hasil yang lebih baik pula tanpa memengaruhi kesehatan tanah. Mikroorganisme pelarut fosfat berperan penting dalam nutrisi tanaman melalui peningkatan serapan P oleh tanaman dan penggunaannya sebagai PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacter) merupakan kontribusi penting untuk biofertilisasi tanaman pertanian (Fiuza et al., 2022). Meskipun beberapa kelompok bakteri seperti (*Pseudomonas* dan *Basil*) dan kelompok fungi (*Aspergillus* dan *Penicillium*) telah diidentifikasi sebagai PSM, kinerja relatifnya dalam kondisi in situ tidak dapat diandalkan. Oleh karena itu diperlukan kelompok mikroba yang dimodifikasi secara genetik yang dapat menghasilkan hasil yang lebih baik, melarutkan posfat dalam tanah dan meningkatkan kesehatan tanah.

Di lingkungan alami banyak mikroorganisme tanah dan sekitar perakaran atau rizosfer yang efektif dalam melepaskan fosfor yang terikat oleh senyawa lainnya dalam tanah melalui pelarutan dan mineralisasi. Banyak spesies fungi atau jamur dan bakteri tanah mampu melarutkan fosfor secara in vitro dan beberapa di antaranya dapat memobilisasi fosfor dalam tanaman. PSM meningkatkan bioavailabilitas fosfor yang tidak larut dalam tanah untuk digunakan oleh tanaman. Oleh karena itu, mikroorganisme pelarut/mineralisasi fosfat merupakan strategi yang menjanjikan untuk peningkatan penyerapan fosfor tanaman dan dengan demikian mengurangi penggunaan pupuk kimia yang berdampak negatif terhadap lingkungan. Berbagai jenis asam organik yang dihasilkan oleh mikroba pelarut fosfat dan secara tidak langsung oleh organisme tanah lainnya menjadi penyebab utama larutnya fosfor.

Sejauh ini telah banyak ditemukan berbagai jenis mikroba yang berperan sebagai pelarut posfat. Berikut kumpulan mikroba yang ada di alam dan telah diidentifikasi sebagai PSM atau mikroba pelarut posfat (Tabel 4.1.).

Tabel 4.1: Mikroba Pelarut Posfat Di Alam (Sharma et al., 2013; Thakur et al., 2014; Kumar et al., 2018; Brígido et al., 2019; Goswami et al., 2019; Bharwad dan Rajkumar, 2020; Doilom et al., 2020; Ramamoorthy et al., 2020; Saadouli et al., 2021; Vera-Morales et al., 2023)

Mikroba	PSM
Bakteri	<i>Bacillus circulans; Bacillus pulvifaciens; Bacillus megaterium</i>
	<i>Bacillus polymyxa; B. subtilis; B. mycoides;</i>

	<i>Bacillus coagulans</i> ; <i>B. Fusiformis</i> ; <i>B. pumilus</i>
	<i>B. chitinolyticus</i> ; <i>Bacillus sircalmous</i>
	<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>
	<i>Pseudomonas</i> sp.,; <i>Pseudomonas canescens</i> ; <i>Pseudomonas putida</i> ; <i>Pseudomonas calcis</i> ; <i>Pseudomonas striata</i> ; <i>Pseudomonas fluorescens</i>
	<i>Pantoea agglomerans</i>
	<i>Rhizobium leguminosarum</i> ; <i>Rhizobium meliloti</i>
	<i>Mesorhizobium mediterraneum</i> ; <i>Bradyrhizobium</i> sp.,
	<i>Brevibacterium</i> sp.,; <i>Citrobacter</i> sp.,
Fungi	<i>Aspergillus Niger</i> ; <i>Aspergillus clavatus</i> ; <i>Aspergillus awamori</i>
	<i>Aspergillus candidus</i> ; <i>A. parasiticus</i> ; <i>Aspergillus fumigatus</i> ; <i>A. rugulosus</i> ; <i>Aspergillus flavus</i>
	<i>Aspergillus foetidus</i> ; <i>A. nidulans</i> ; <i>A. wentii</i> ; <i>Aspergillus terreus</i>
	<i>Aspergillus tubingensis</i> ; <i>Aspergillus sydawi</i> ; <i>A. ochraceus</i> ; <i>A. versicolor</i>
	<i>Penicillium bilaii</i> ; <i>Penicillium citrinum</i> ; <i>P. funicolosum</i>
	<i>Penicillium digitatum</i> , <i>P. lilacinium</i> ; <i>P. balaji</i>
	<i>Penicillium oxalicum</i> ; <i>Penicillium simplicissimum</i> ; <i>P. rubrum</i>
	<i>Arthrobotrys oligospora</i> ; <i>Trichoderma viride</i> ; <i>Glomus fasciculatum</i> .
	<i>Fusarium oxysporum</i> ; <i>Alternaria teneius</i> , <i>Achrothcium</i> sp.
	<i>Cephalosporium</i> sp., ; <i>Cladosprium</i> sp.,
Actinomycetes	<i>Streptomyces albus</i> , <i>S. cyaneus</i> ; <i>Streptoverticillium album</i>
	<i>Acinetobacter rhizosphaerae</i>
	<i>Actinomyces</i> ; <i>Streptomyces</i>
Cyanobacteria	<i>Calothrix braunii</i>
	<i>Anabena</i> sp.,; <i>Nostoc</i> sp.,; <i>scytonema</i> sp.

Fungi menghasilkan berbagai macam metabolit sekunder dan senyawa bioaktif, yang dapat menjadi sumber obat dan/atau antibiotik alternatif. Fungi berasosiasi dengan tanaman dan memainkan peran penting dalam memacu pertumbuhan tanaman dan meningkatkan kesuburan tanah dengan menggunakan mekanisme seperti pelarutan fosfor, seng (Zn), kalium (Kushwaha et al., 2020); produksi zat pengatur tumbuh (auksin, sitokinin,

giberelin, etilen dan asam absisat) (Diagne et al., 2020), enzim hidrolitik (xilanase, lakase, pektinase, selulase), dan siderofor (Ruginescu et al., 2020). Selain memunculkan reaksi pertahanan tanaman terhadap patogen; Fungi PGP (Promotion Growth Plant) atau 'pemacu tumbuh tanaman' juga membantu tanaman/tumbuhan dalam pengentasan tekanan abiotik di bawah lingkungan yang ekstrim (Amna et al., 2020). Fungi PGP telah dilaporkan dari genus yang berbeda dari filum *Chytridiomycota*, *Zygomycota*, *Glomeromycota*, *Ascomycota*, dan *Basidiomycota* (Naumova et al., 2022).

Fosfor (P) adalah makronutrien yang dibutuhkan untuk memenuhi siklus hidup tanaman. Karena unsur P sangat penting dalam setiap aspek pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Defisiensi P dapat menurunkan pertumbuhan dan perkembangan tanaman. Meskipun tanah memiliki P total dalam bentuk senyawa organik dan anorganik, sebagian besar tetap tidak aktif sehingga tidak tersedia bagi tanaman. Karena banyak petani tidak mampu menggunakan pupuk P untuk mengurangi defisit P, diperlukan teknik alternatif untuk menyediakan P dalam tanah. Mikroba pelarut fosfat (PSM) adalah kelompok mikroorganisme menguntungkan yang mampu menghidrolisis senyawa fosfor organik dan anorganik yang tidak larut menjadi bentuk P terlarut yang mudah diasimilasi oleh tanaman (Dhuldhaj dan Malik, 2022).

PSM memberikan pendekatan yang ramah lingkungan dan ekonomis untuk mengatasi kelangkaan P dan penyerapan selanjutnya oleh tanaman. Meskipun PSM telah menjadi subjek penelitian selama beberapa dekade, manipulasi PSM untuk memanfaatkan peningkatan fiksasi P dalam tanah dan meningkatkan produksi tanaman di tingkat lapangan belum dikomersialkan secara memadai.

4.4 Perkembangan Mikroba Pelarut Posfat terhadap Produktivitas Tanaman

Telah banyak diketahui bahwa mikroorganisme fungi atau bakteri selain untuk sektor pertanian juga memiliki potensi untuk dimanfaatkan di berbagai sektor industri seperti medis, dan makanan. Dalam sektor medis, fungi atau produk dari fungi digunakan untuk mengendalikan penyakit pada manusia dan hewan. Sedangkan dalam sektor industri makanan fermentasi, fungi digunakan untuk membuat minuman beralkohol, keju, roti, yogurt dan berbagai olahan

makanan lainnya. Selain itu pada sektor pertanian digunakan untuk membantu meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman serta melindunginya dari patogen. Hal-hal diatas, berkaitan dengan keanekaragaman hayati, fungi menguntungkan dari habitat yang berbeda dan penerapan bioteknologi dalam pemacu pertumbuhan tanaman dan kesehatan tanah.

Sebagai sebuah bidang, ekologi berkembang dari penelitian tentang sistem tumbuhan dan hewan menjadi sistem mikroba yang berbeda secara signifikan. “Konsep spesies” yang dianut oleh banyak ahli biologi tumbuhan dan hewan mendefinisikan spesies sebagai kelompok organisme yang kawin silang yang secara reproduktif (dan genetik) diisolasi dari organisme lain. Kebanyakan spesies mikroba bereproduksi secara asexual. Mereka tidak kawin silang dan bagian dari konsep spesies biologis ini tidak berlaku. Pertukaran genetik bukanlah bagian mendasar dari siklus hidup bakteri, spesies lain dan lingkungan. Namun, ada mekanisme yang dapat menyebabkan transfer genetik antar spesies. Ini menyiratkan bahwa spesies bakteri tidak diisolasi secara genetik, sehingga bagian kedua dari konsep spesies biologis mungkin juga tidak berlaku.

Dalam perkembangannya mikroba pelarut fosfat telah mengalami peningkatan secara signifikan. Dorongan untuk menyediakan bahan pangan dengan populasi manusia yang terus meningkat tanpa mengenyampingkan kesehatan tanah secara berkelanjutan membuat peran mikroba dalam tanah terus berkembang. Bahkan saat ini manfaat mikroba telah menjadi sumber pasar yang berpotensi menyerap ekonomi dalam jumlah yang besar.

Selanjutnya perubahan iklim menjadikan sistem produksi pertanian mengarah pada intensifikasi pertanian. Pilihan yang menjanjikan adalah intensifikasi ekofungsional melalui pertanian organik, sebuah pendekatan yang didasarkan pada penggunaan dan peningkatan sumber daya alam internal dan meningkatkan produktivitas pertanian, sekaligus meminimalisir dampak negatif pada lingkungan. Dalam konsep ini mikrobiota tanah aktif memainkan peran penting untuk berbagai layanan ekosistem berbasis tanah seperti siklus unsur hara, pengendalian erosi dan pengendalian hama dan penyakit tanaman.

Telah dijelaskan sebelumnya bahwa mikroorganisme pelarut fosfat (PSM) memainkan peran yang sangat penting dalam nutrisi fosfor dengan menukar ketersediaannya untuk tanaman melalui pelepasan dari rekatan fosfor tanah anorganik dan organik melalui solubilisasi dan mineralisasi. Mekanisme utama dalam tanah untuk pelarutan mineral fosfat adalah dengan menurunkan pH

tanah dengan produksi asam organik oleh mikroba dan mineralisasi fosfor organik dengan asam fosfat (Anand et al., 2016). Untuk memenuhi kebutuhan fosfor tanaman, sumber fosfor tambahan diaplikasikan pada tanaman dalam bentuk pupuk kimia. Salah satu bentuk fosfat yang paling umum adalah pupuk dalam bentuk batuan fosfat atau superfosfat.

Efektivitas peran PSM (Phosphate Solubilizing Microbes) terhadap pertumbuhan dan hasil tanaman dilakukan dengan pendekatan bioteknologi yaitu menghasilkan biofertilizer secara in vitro. Sejauh ini telah banyak perusahaan dunia yang bergerak dalam bidang penyediaan *biofertilizer* untuk memenuhi ketersediaan unsur hara dibidang pertanian lebih terkhusus pangan. Perusahaan atau manufaktur yang memproduksi kebutuhan *biofertilizer* Dunia dapat dilihat pada Table 4.2.

Tabel 4.2: Perusahaan-perusahaan yang memproduksi biofertilizer PSM (Phosphate Solubilizing Microbes) (Soumare et al., 2020)

Unit Produk	Nama Produk	Komponen PMS	Bentuk	Manfaat yang dihasilkan	Referensi (Web ID)
TNAU Agritech/India	Phosphobacteria dan Phosphatika	2 spesies bacterial dan 2 fungal	Bubuk dan cair	Meningkatkan hasil 5-30 %	http://agritech.tnau.ac.in
Monarch Bio-Fertilisers and Research Centre/India	Phosphobacteria	Bacteria	Bubuk	Melarutkan 30-50 kg posfor/ha	http://www.monarchbio.co.in/bio_fertilizers.html
SAFS Organic Enterprises /India	Phosphobacterium	Bacteria	Bubuk dan cair	Tanpa Indikasi	https://www.indiamart.com/safsorganice nterprises/bio-fertilizer.html#bio-fertilizer-phosphobacterium

Agro bio tech Research Centre LTD/India	Phosphobacteria	Bacillus megaterium var. phosphaticum	Bubuk dan cair	Tanpa Indikasi	http://www.abtecbiofert.com/products.htm
Ajay Bio-Tech (India) Ltd/India	Biophos	Bacteria & Fungi	Bubuk (spora) cair	Tanpa Indikasi	https://www.linkedin.com/company/ajay-biotechindia-ltd/?originalSubdomain=fr
International Panaacea Limited /India	Phosphofix	Bacteria	Bubuk	Mereduksi 25-30% kebutuhan pupuk P	https://www.iplbiologicals.com/
Varsha Bioscience And Technology India Private Limited/India	Phosphomax	Bacillus megatherium	Bubuk	Meningkatkan hasil tanaman 15-25%	http://www.varshabioscience.com/products/phosphomax.html
T. Stanes & Company Limited/India	Symbion-P	Bacillus megaterium var. phosphaticum.	Cair	Menghemat 50% lebih pengeluaran dalam penggunaan pupuk P	http://www.tsstanes.com/products-symbion-p.html
Novozymes Biologicals Limited /Canada	Jumpstart LCO	Penicillium bilaii	Bubuk-Granular	Melarutkan 8,25 kg/ha	https://www.novozymes.com/en/advance-yourbusiness/agriculture/crop-production/jumpstart
AgriLife /India	P Sol B®-BM	Bacillus megaterium	Bubuk (spora)	Tanpa Indikasi	http://www.agrilife.in/bioferti_psolb_bm.htm

Banyak investor dunia yang telah lama memprediksi potensi pasar dalam pengembangan *biofertilizer* untuk kebutuhan pertanian, hal ini berdasarkan indikator peningkatan jumlah populasi manusia di Bumi dan ditambah kondisi iklim yang tidak optimal dalam pembudidayaan tanaman pangan serta berpengaruh terhadap keadaan kesuburan tanah. Hadirnya perusahaan yang bergerak dibidang produksi *biofertilizer* diharapkan dapat memenuhi kebutuhan nutrisi tanaman sehingga dapat meningkatkan ketersediaan pangan seluruh dunia. Namun beberapa hal yg perlu dikaji oleh para peneliti dan atau akademisi ialah seberapa besar dampak yang dihasilkan oleh zat pembawa *biofertilizer* yang diproduksi secara *in vitro* tersebut. Artinya bahwa kebutuhan pangan manusia harus terus dipenuhi namun tidak mengabaikan kelestarian alam atau sektor ekologi, sehingga keberlangsungan hidup tumbuhan dan hewan di alam akan terus terjaga kelestariannya.

Saat ini penggunaan *biofertilizer* untuk memenuhi kebutuhan unsur hara tanaman tanpa merusak kesehatan tanah dirasa tepat. Hal ini dapat menjadi pilihan alternatif dalam gencarnya penggunaan pupuk kimia oleh petani yang dampaknya dapat merusak kesehatan tanah. Keresahan yang dihadapi mayoritas petani saat ini ialah menurunnya kesuburan tanah, meningkatnya serangan hama dan penyakit tanaman serta rusaknya ekosistem akibat praktek budidaya pertanian yang memanfaatkan bahan kimia untuk meningkatkan produksi tanaman (Atieno et al., 2020). Hadirnya *Biofertilizer* atau pupuk hayati dapat menjadi pilihan alternatif untuk menghadapi keresahan yang dialami oleh petani.

Bab 5

Pemanfaatan Mikroorganisme Pelarut Fosfat Untuk Efisiensi Pemupukan Fosfat

5.1 Pendahuluan

Produktivitas tanaman tergantung pada nutrisi tanaman, yang terutama diperoleh dari tanah. Fosfat (P) merupakan makronutrien yang berperan penting dalam pertumbuhan bersama dengan nitrogen dan kalium dibutuhkan dalam jumlah banyak untuk berbagai fungsi metabolisme (Kalayu, 2019). Tanaman membutuhkan fosfat untuk membentuk makromolekul seperti protein, asam nukleat, koenzim, fosfoprotein dan fosfolipid [2-4]. Selain itu, P merupakan salah satu unsur terpenting pembatas produksi biomassa di ekosistem darat dan penyebab eutrofikasi terus menerus di perairan kontinen dan pesisir karena penggunaan pupuk P yang meluas [5-7].³ Pengaruh P terhadap pertumbuhan tanaman berhubungan langsung dengan perkembangan akar, penguatan batang, pembentukan bunga dan biji, produksi energi, respon penyimpanan, respon translokasi, pertumbuhan akar, pembelahan dan pemuatan sel, ketahanan tanaman terhadap penyakit, konversi gula menjadi

pati, dan genetika (Sharma, Sayyed, Trivedi dan Gobi, 2013; Satyaprakash, Nikitha, Sadhana, Reddi dan Vani, 2017).

Tanaman sering kali kesulitan untuk mendapatkan fosfat yang cukup dari tanah. Ini karena fosfat cenderung terikat erat pada partikel tanah dan tidak mudah diambil oleh akar tanaman serta relatif tidak mudah tercuci. Selain itu, sebagian besar tanah di dunia memiliki kandungan fosfat yang rendah sehingga statusnya dapat dengan mudah berubah dari kondisi tersedia menjadi tidak tersedia bagi tanaman dalam bentuk Ca-P, Mg-P, Al-P, Fe-P atau *Occluded-P*. Ketersediaan fosfat yang rendah di tanah menyebabkan para petani seringkali perlu memberikan pupuk fosfat untuk meningkatkan pertumbuhan dan produksi tanaman. Namun, penggunaan pupuk fosfat yang berlebihan dapat menyebabkan pencemaran air tanah dan lingkungan yang merugikan kesehatan manusia dan lingkungan. Oleh karena itu, penting bagi petani dan ahli pertanian untuk memahami ketersediaan fosfat di tanah dan cara-cara untuk meningkatkan ketersediaan fosfat bagi tanaman tanpa merusak lingkungan. Dengan memahami hal ini, petani dapat menghasilkan pertanian yang lebih produktif dan berkelanjutan.

Secara umum terdapat beberapa faktor yang dapat memengaruhi ketersediaan unsur hara P dalam tanah, meliputi:

1. pH tanah

pH tanah yang rendah (asam) atau tinggi (basa) dapat mengurangi ketersediaan P bagi tanaman. Hal ini disebabkan reaksi kimia antara P dan partikel tanah lebih efektif pada kisaran pH tertentu, yaitu kisaran pH 6-7. Pada tanah masam, sebagian besar P yang diberikan bersenyawa menjadi Al-P, Fe-P, dan P yang tertahan, yang tidak larut dan tidak tersedia bagi tanaman. Ketersediaan unsur P yang diaplikasikan hanya 10-30% yang dapat diserap oleh tanaman, sisanya menjadi tidak larut serta sebagian kecil hilang karena perkolasi air (Jones, 1982).

2. Tekstur tanah

Tanaman dapat menyerap P lebih mudah di tanah berpasir atau tanah liat daripada di tanah liat. Tanah liat memiliki kemampuan yang lebih baik untuk mengikat dan menyimpan P, sehingga tanaman sulit menyerapnya.

3. Bahan Organik

Kadar bahan organik tanah dapat meningkatkan ketersediaan P. Hal ini disebabkan kemampuan bahan organik membentuk zat organik yang dapat melarutkan P dan menjaga ketersediaannya di dalam tanah.

4. Sifat kimia tanah

Sifat kimia tanah seperti konsentrasi ion logam B., dapat memengaruhi ketersediaan P. Beberapa ion seperti besi (Fe), aluminium (Al) dan kalsium (Ca) dapat membentuk senyawa dengan P yang kurang tersedia bagi tanaman.

5. Mikroorganisme tanah

Mikroorganisme penghuni tanah seperti bakteri, jamur dan ganggang dapat memainkan peran penting dalam meningkatkan ketersediaan P. Beberapa mikroorganisme dapat membantu melarutkan P dalam tanah agar lebih tersedia bagi tanaman.

6. Varietas Tanaman

Varietas tanaman yang berbeda mungkin memiliki kebutuhan P yang berbeda. Beberapa varietas tanaman lebih efisien dalam mengambil P dari tanah dan menggunakannya untuk pertumbuhan dan produksi, sementara yang lain memerlukan tingkat P yang lebih tinggi.

5.2 Jenis-Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Kandungan P dalam tanah dapat bervariasi tergantung pada jenis tanah, iklim, dan tindakan manusia seperti penggunaan pupuk. Kandungan P dalam tanah umumnya dinyatakan dalam satuan ppm (parts per million) atau mg/kg (miligram per kilogram) tanah. Kandungan yang optimal untuk pertumbuhan tanaman bervariasi tergantung pada jenis tanaman yang ditanam, namun umumnya kandungan P yang baik untuk tanaman berkisar antara 20-40 ppm. Tanah yang kurang subur biasanya memiliki kandungan fosfat yang rendah, sehingga dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman.

Salah satu faktor penting dari ketersediaan unsur P dalam tanah berkaitan dengan ketersediaan aktivitas mikroba. Pemanfaatan mikroba di sekitar atau yang berhubungan dengan akar tanaman sangat penting peranannya karena selain mampu mengikat unsur hara juga menghasilkan hormon pertumbuhan, mencegah penyakit tanah dan melarutkan unsur hara yang tidak tersedia bagi tanaman (Husen, Stakaranwati dan Hastuti, 2006). Kehadiran mikroba tersebut dapat digunakan sebagai inisiator untuk meningkatkan daya dan efisiensi pupuk yang diberikan. Keuntungan lain menggunakan mikroorganisme untuk tanaman adalah lebih ramah lingkungan. Teknologi aplikasi mikroba dan pengurai nutrisi hara tanaman telah banyak dikembangkan dan terbukti sangat efektif dalam meningkatkan efisiensi dan potensi pemupukan pada berbagai jenis tanaman (Husen, Stakaranwati dan Hastuti, 2006; Widawati dan Suliasih, 2006; Koesrini dan William, 2009; Anas dan Rakhmadina, 2012).

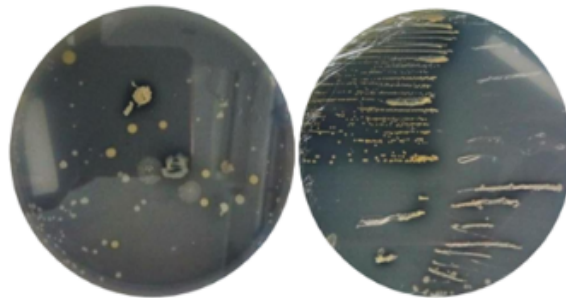
Pada umumnya pelarut P anorganik mikroba dalam tanah sekitar 104-106 per gram tanah, dan sebagian besar berada di zona perakaran. Penelitian dan penggunaan mikroba pelarut P telah dilakukan sejak tahun 1930-an (Waksman dan Starkey, 1981; Gerretsen, 1948). Negara pertama yang memproduksi mikroba ini sebagai pupuk hayati adalah Rusia (negara bekas Uni Soviet) pada tahun 1947. Inokulum pelarut P ini banyak digunakan di negara-negara Eropa Timur dengan nama dagang *Phosphobacterium*.

Berikut ini adalah beberapa golongan mikroba yang membantu dalam penyediaan P dalam tanah:

1. Bakteri Pelarut Fosfat (BPF)

BPF adalah bakteri yang mampu memanfaatkan fosfat yang terkandung dalam senyawa organik atau anorganik sebagai sumber nutrisi. Beberapa contoh BPF adalah *Agrobacterium spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Bacillus circulans*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Rhodococcus*, *Salmonella*, *Sinomonas*, *Serratia*, *Bradyrhizobium*, *Thiobacillus* (Raj, Linda dan Babyson, 2014) (Kumar, Baudhdh, Barman dan Singh, 2014), *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Kushneria* (*Paenibacillus*, *Ralstonia*, dan *Rhizobium* (Zhu, Qu, Hong dan Sun, 2011), (Istina, Widiastuti, Joy, dan Antralina, 2015). Selain itu, kelompok bakteri pelarut P juga meliputi jenis *Actinomycetes* yaitu jenis mikroorganisme berupa bakteri *filamentous* yang mampu melarutkan fosfat. Sekitar 20% *aktinomisetes* juga ditemukan dapat

melarutkan **fosfat** yaitu *genus Micromonospora* dan *Streptomyces*. Bakteri pelarut fosfat biasanya memiliki kapasitas untuk merombak senyawa fosfat organik yang kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana. Mereka juga mampu mengubah senyawa fosfat anorganik yang tidak dapat diserap oleh tanaman menjadi bentuk yang lebih mudah dicerna, seperti fosfat bebas dan ion fosfat.



Gambar 5.1: (a-b). Hasil Isolasi Bakteri Pelarut Fosfat (a) Pemurnian Isolat CB1 (b) (Triana, Wibowo, Sipriyadi, Darwis, dan Nusantara, 2019)

2. Jamur Pelarut Fosfat

Jamur pelarut fosfat merupakan jenis mikroorganisme yang mampu memecah senyawa organik dan anorganik yang mengandung fosfat, seperti guano atau batu fosfat. Beberapa contoh jamur pelarut fosfat adalah *Aspergillus niger*, *Penicillium*, dan *Trichoderma*.

3. Cendawan Mikoriza Arbuskular (CMA): Cendawan Mikoriza Arbuskular adalah jenis cendawan simbiosis mutualisme dengan akar tanaman. CMA mampu melarutkan fosfat dari tanah dan mengirimkannya ke dalam tanaman. Beberapa contoh CMA adalah *Glomus mosseae* dan *Glomus intraradices*. Selanjutnya, khamir *Yarrowia lipolyca* juga ditemukan memiliki potensi untuk melarutkan fosfat (Ingle & Padole, 2017).

4. Alga Pelarut Fosfat

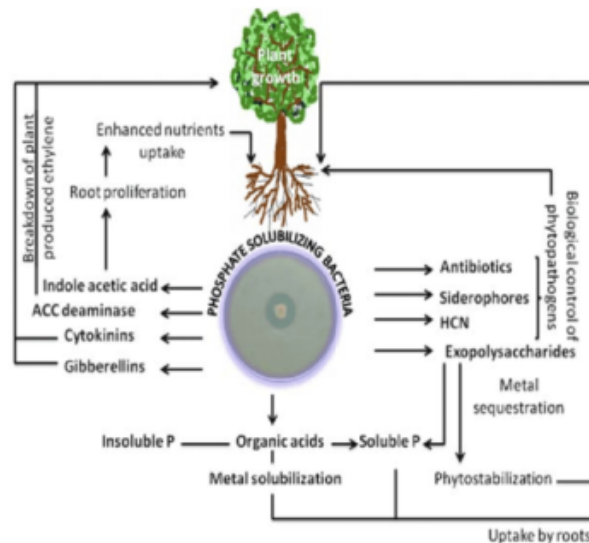
Beberapa jenis alga juga mampu melarutkan fosfat. Contohnya, *Chlorella vulgaris*, *Nostoc* sp., dan *Scenedesmus* sp.

Adapun 1-50% dari total populasi mikroba tanah merupakan bakteri pelarut fosfat, sedangkan hanya 0,1-0,5% merupakan jamur pelarut fosfat (Chen, Rekha, Arun, Shen, Lai, dan Young, 2006). Jamur umumnya memiliki aktivitas pelarut fosfat yang lebih tinggi daripada bakteri karena jamur dapat menghasilkan lebih banyak asam seperti glukonat, sitrat, laktat, 2-ketoglukonat, oksalat dan tartarat (Sharma, Sayyed, Trivedi dan Gobi, 2013). Aplikasi kombinasi jamur dan bakteri yang larut dalam fosfat memiliki efek yang lebih baik pada ketersediaan fosfor terlarut dibandingkan dengan aplikasi tunggal (Fitriatin, Yuniarti, Turmuktini dan Ruswandi, 2014).

5.3 Mekanisme Pelarutan Fosfat oleh Mikroorganisme dalam Efisiensi Pemupukan

Fosfat anorganik dalam tanah adalah Fe-P, Al-P dan Ca-P. Mikroba pelarut fosfat (MPF) melarutkan fosfat anorganik dengan berbagai cara, yaitu dengan menghasilkan asam organik, menghasilkan asam + anorganik, H₂S, menghilangkan proton dari NH, menghasilkan 24 siderofor dan eksopolisakarida. Asam organik dapat meningkatkan ketersediaan P dalam tanah melalui beberapa mekanisme, di antaranya adalah: (1) anion organik bersaing dengan ortofosfat pada permukaan tapak jerapan koloid yang bermuatan positif; (2) pelepasan ortofosfat dari ikatan logam-P melalui pembentukan kompleks logam organik dan (3) modifikasi muatan permukaan tapak jerapan oleh ligan organik (Havlin, Beaton, Tisdale, dan Nelson, 1999). Asam sitrat dan oksalat digolongkan sangat efektif dalam menurunkan retensi P dari kaolinit dan gibsit, sedangkan asam malonat, tartarat, dan malat berefektivitas sedang, serta asam asetat dan suksinat digolongkan kurang efektif. Pada tanah vulkanik yang kaya alovani, asam-asam organik (benzoat, 2-OH benzoat, salisilat dan ptalat) tidak mampu menurunkan retensi dengan meneliti pengaruh asam organik (sitrat, tartarat dan asetat) pada gel Al dan Fe terhadap jerapan P. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa anion organik, maka Fe menjerap P dalam jumlah yang sangat banyak. Asam sitrat menjerap Fe jauh lebih banyak dibanding tartarat, demikian pula dalam hal mengurangi P terjerap. Tetapi jumlah Al yang diikat kedua asam tersebut tidak berbeda. Asam asetat tidak efektif dalam menurunkan retensi, karena asetat kurang kuat

dalam membentuk kompleks dengan Al maupun Fe. Disamping meningkatkan P tersedia, beberapa asam organik berbobot molekul rendah ini juga dilaporkan dapat mengurangi daya racun Al yang dapat dipertukarkan (Al-dd) pada tanaman kapas (Hue, Craddock dan Adams, 1986). Peneliti tersebut menggolongkan kemampuan detoksifikasi asam organik terhadap Al-dd dalam tiga kelompok, yaitu kuat (sitrat, oksalat, tartarat); sedang (malat, malonat dan salisilat); dan lemah (suksinat, laktat, asetat dan ptalat). Hasil penelitian Premono, Widyastuti, dan Anas (1992) menunjukkan bahwa mikroba pelarut fosfat secara nyata mampu mengurangi Fe, Mn dan Cu yang terserap oleh tanaman jagung yang ditanam pada tanah masam, sehingga berada pada tingkat kandungan yang normal. Terdapatnya asam-asam organik sitrat, oksalat, malat, tartarat, dan malonat di dalam tanah sangat penting artinya dalam mengurangi pengikatan P oleh unsur penjerapnya dan mengurangi daya racun aluminium pada tanah masam.



Gambar 5.2: Pengaruh Mikroorganisme Pelarut P pada Tanaman

Dalam aktivitasnya, mikroba pelarut P akan menghasilkan asam-asam organik di antaranya ialah asam sitrat, glutamat, suksinat, laktat, oksalat, glioksalat, malat, fumarat, tartarat dan α -ketobutirat (Alexander, 1977). Meningkatnya asam-asam organik tersebut biasanya diikuti dengan penurunan pH, sehingga mengakibatkan terjadinya pelarutan P yang terikat oleh Ca. Penurunan pH juga dapat disebabkan terbebasnya asam sulfat dan nitrat pada oksidasi kemoautotrofik sulfur dan amonium, berturut-turut oleh bakteri *Thiobacillus* dan *Nitrosomonas* (Alexander, 1977).

2 Asam organik mampu meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah melalui beberapa mekanisme, di antaranya adalah: (1) anion organik bersaing dengan ortofosfat pada permukaan tapak jerapan koloid yang bermuatan positif (Nagarajah, Posneer and Quirk, 1970 dalam Premono dan Widyastuti, 1994); (2) pelepasan ortofosfat dari ikatan logam-P melalui pembentukan kompleks logam organik (Beaucamp dan Hume, 1997); dan (3) modifikasi muatan permukaan tapak jerapan oleh ligan organik (Havlin, Beaton, Tisdale dan Nelson, 1999). Asam sitrat dan oksalat digolongkan sangat efektif dalam menurunkan retensi P dari kaolinit dan gibsit, sedangkan asam malonat, tartarat, dan malat berefektivitas sedang, serta asam asetat dan suksinat digolongkan kurang efektif (Nagarajah, Posneer and Quirk, 1970 dalam Premono dan Widyastuti, 1994). Pada tanah vulkanik yang kaya alovana, asam-asam organik (benzoat, p-OH benzoat, salisilat dan ptalat) tidak mampu menurunkan retensi P. Penelitian pengaruh asam organik (sitrat, tartarat dan asetat) pada gel Al dan Fe terhadap jerapan P. Hasilnya menunjukkan bahwa tanpa anion organik, maka Fe menyerap P dalam jumlah yang sangat banyak. Asam sitrat menyerap Fe jauh lebih banyak dibanding tartarat, demikian pula dalam hal mengurangi P terjerap. Tetapi jumlah Al yang diikat kedua asam tersebut tidak berbeda. Asam asetat tidak efektif dalam menurunkan retensi, karena asetat kurang kuat dalam membentuk kompleks dengan Al maupun Fe. Disamping meningkatkan P tersedia, beberapa asam organik berbobot molekul rendah ini juga dilaporkan dapat mengurangi daya racun Al yang dapat dipertukarkan (Al-dd) pada tanaman kapas (Hue, Craddock dan Adamet, 1986). Peneliti tersebut menggolongkan kemampuan detoksifikasi asam organik terhadap Al-dd dalam tiga kelompok, yaitu kuat (sitrat, oksalat, tartarat); sedang (malat, malonat dan salisilat); dan lemah (suksinat, laktat, asetat dan ptalat). Hasil penelitian Premono, Widyastuti, dan Anas (1992) menunjukkan bahwa mikroba pelarut fosfat secara nyata mampu mengurangi Fe, Mn dan Cu yang terserap oleh tanaman jagung yang ditanam pada tanah masam, sehingga berada pada tingkat kandungan yang normal. Terdapatnya asam-asam organik sitrat, oksalat, malat, tartarat, dan malonat di dalam tanah sangat penting artinya dalam mengurangi pengikatan P oleh unsur penjerapnya dan mengurangi daya racun aluminium pada tanah masam.

Bakteri pelarut fosfat (BPF) merupakan salah satu mikroorganisme tanah yang dapat memperbaiki penyediaan P pada tanah masam dengan menghasilkan asam organik sehingga kelarutan Al dan Fe dapat diturunkan karena adanya pengikatan oleh asam organik (Illmer, and Schinner, 1992). Asam malat, sitrat dan oksalat merupakan asam organik yang mempunyai afinitas tinggi terhadap

logam yang mempunyai valensi 3 seperti Al^{3+} dan Fe^{3+} (Jones, 1982). Untuk mengkaji peranan bakteri pelarut fosfat pada lahan marginal yang bersifat menjerap P, kiranya penting untuk dilakukan suatu penelitian.

Bab 6

Genetika Mikroba Pelarut Fosfat

6.1 Pendahuluan

Mineral fosfat di dalam tanah tersedia dalam bentuk mineral primer seperti apatit, hidroksiapatit dan oksiapatit yang merupakan bagian dari lapisan batuan stratum yang memiliki karakteristik yaitu tidak terlarut, akan tetapi dalam kondisi tertentu kandungan mineral fosfat tersebut pada akhirnya dapat terlarut. Sejumlah penelitian telah membuktikan kemampuan spesies mikroba yang dapat melarutkan senyawa fosfat anorganik tidak terlarut seperti trikalsium fosfat, dikalsium fosfat, hidroksiapatit dan fosfat yang terkandung pada bebatuan. Begitupula ketersediaan fosfat dalam tanah yang berasal dari substrat organik, membutuhkan proses hidrolisis untuk menjadi fosfat anorganik yang dapat diserap oleh tumbuhan. Serangkaian proses tersebut melibatkan kerja enzim yang disintesis oleh berbagai jenis bakteri (Rodríguez dan Fraga, 1999).

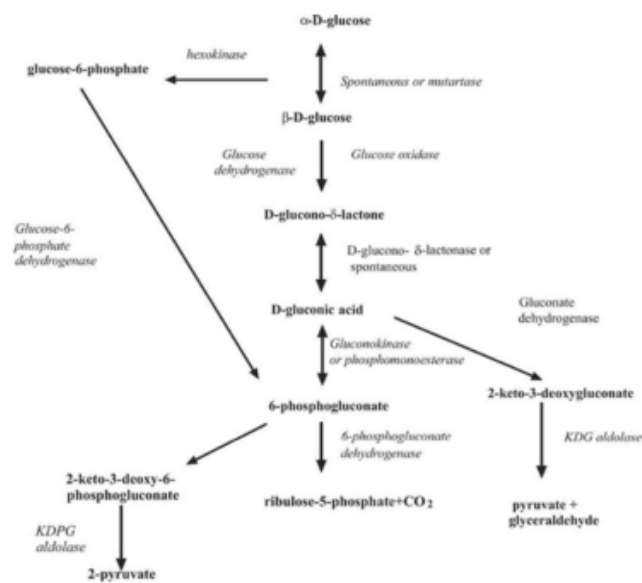
Mikroba tanah banyak memberikan manfaat terhadap tanaman, salah satunya adalah meningkatkan pelarutan fosfat di dalam tanah. Fosfat tidak terlarut di dalam tanah oleh mikroba diubah menjadi fosfat terlarut yang dapat diserap oleh tanaman dengan mensekresikan asam-asam organik seperti asam format,

asetat, propionat, suksinat, laktat, glikolat dan fumarat (Suliasih, 2010). Selain itu ada dua enzim utama yang bekerja dalam proses pelarutan fosfat di dalam tanah yaitu enzim *acid phosphatase* (acid phosphatase) dan enzim vitase (phytase) karena keduanya memiliki substrat yang dominan di dalam tanah (Rodríguez dkk, 2006).

Salah satu studi yang menyelidiki penggunaan acid phosphatase di bidang pertanian dilakukan oleh Das dkk (2010). Para peneliti menggunakan bakteri penghasil fosfatase asam untuk menginokulasi tanaman padi dan menemukan bahwa tanaman tersebut menunjukkan peningkatan pertumbuhan dan hasil dibandingkan dengan tanaman yang tidak diinokulasi. Para peneliti juga menemukan bahwa inokulasi bakteri penghasil *acid phosphatase* meningkatkan ketersediaan fosfor dalam tanah, menunjukkan bahwa bakteri ini dapat digunakan untuk meningkatkan kesuburan tanah dan pertumbuhan tanaman. Namun, penggunaan acid phosphatase dalam pertanian tidak terbatas pada inokulan bakteri. Dalam beberapa kasus, enzim acid phosphatase langsung diaplikasikan ke tanah untuk meningkatkan ketersediaan fosfor. Salah satu contohnya adalah penggunaan *acid phosphatase* yang diekstraksi dari akar tanaman untuk meningkatkan pelepasan fosfor dari sumber organik di dalam tanah. Secara keseluruhan, penggunaan *acid phosphatase* dalam pertanian berpotensi untuk memperbaiki kesuburan tanah dan meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman. Namun, diperlukan lebih banyak penelitian untuk memahami sepenuhnya mekanisme yang mendasari penggunaan acid phosphatase dan untuk mengoptimalkan penerapannya di lingkungan pertanian.

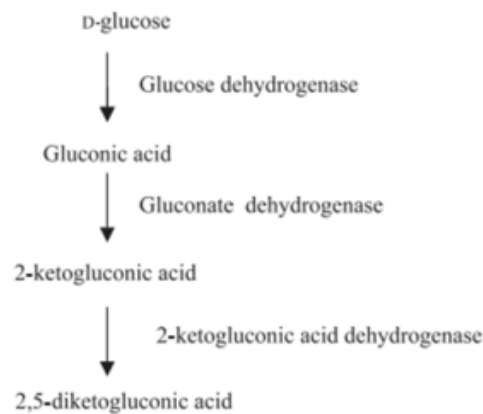
6.2 Genetik Pelarutan Mineral Fosfat

Secara umum kemampuan melarutkan mineral fosfat pada bakteri memiliki kaitan yang erat dengan produksi asam organik. Salah satunya adalah asam glukonat (Gluconic Acid). Asam glukonat merupakan hasil oksidasi glukosa oleh mikroba (Gambar 2.1). Asam glukonat diproduksi di derah periplasma pada bakteri gram negatif kemudian dilepaskan ke luar sel (Goldstein dkk, 1999; Perez dkk, 2007)



Gambar 6.1: Jalur Pembentukan Glukonat (Ramachandran S dkk, 2006)

Rekasi oksidasi glukosa menjadi asam glukonat pada bakteri diinisiasi oleh enzim GDH, selanjutnya dioksidasi menjadi 2-ketoglukonat oleh enzim *Gluconic Acid Dehydrogenase* (GADH), pada tahap oksidasi akhir diubah menjadi asam 2,5-diketogluconic (DKG) dimediasi oleh 2-ketoglukonat dehydrogenase (KGDH) (gambar 2.2).

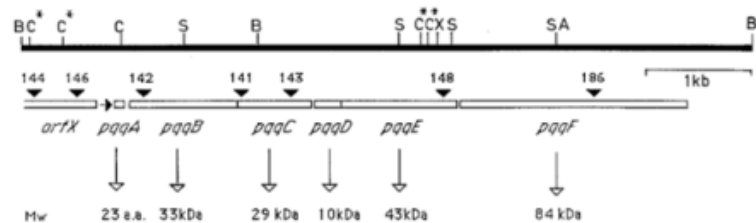


Gambar 6.2: Jalur Spesifik Pembentukan Asam Glukonat pada *Gluconobacter* (Ramachandran S dkk, 2006)

Pradhan dkk (2017), menjelaskan bahwa Enzim *Glucose Dehydrogenase* (GDH) mengkatalisis pembentukan asam glukonat dari glukosa melalui jalur

oksidasi langsung, proses ini juga dibantu oleh kehadiran kofaktor *Pyrroloquinoline Quinone* (PQQ). PQQ adalah ortokuinon trisiklik aromatik yang berfungsi sebagai kofaktor redoks untuk beberapa dehidrogenase bakteri. PQQ merupakan kelompok prostetik yang diperlukan oleh dehidrogenase bakteri termasuk *Methanol Dehydrogenase* (MDH) pada bakteri gram negatif dan beberapa GDH. PQQ berasal dari dua asam amino yaitu tirosin dan asam glutamat, akan tetapi jalur biosintesis dari PQQ masih belum diketahui dengan jelas. Gen penyandi PQQ atau biasa disebut pqq gene telah diisolasi dari beberapa jenis bakteri di antaranya *Kleibselia pneumoniae* (Meulenberg dkk, 1992), *Acinetobacter calcoaceticus* (Goosen dkk, 1989), dan *Methylobacterium extorquens* (Morris dkk, 1994). Terdapat lima gen pqq yang telah diidentifikasi pada *A. calcoaceticus* dan diklasifikasikan menjadi gen pqqI, II, III, IV, dan V. Sedangkan pada *K. pneumonia* juga teridentifikasi lima gen pqq (pqqABCDE), akan tetapi pada bagian downstream dari gen pqqE ditemukan gen yang analog dengan gen pqq sehingga diidentifikasi sebagai gen pqq keenam dengan nama gen pqqF.

Muelenberg (1992) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa kromosom DNA *K. Pneumonia* yang berukuran 6940 base pairs (bp) mengkode enam gen pqq. Struktur DNA kromosom *K.pneumoniae* disusun oleh orfX dan kluster gen pqq yang terdiri atas pqqA, pqqB, pqqC, pqqD, pqqE dan pqqF (gambar 2.3), keenam gen tersebut mengkode protein dengan berat molekul masing-masing 2,7, 34, 29, 10, 40 dan 80 kilodalton (kDa). Meskipun keenam gen pqq telah diketahui akan tetapi fungsi dari masing-masing gen masih belum diketahui pasti (Sashidhar dan Podile, 2010).



Gambar 6.3: Peta Genetik Gen Struktural pqq (Muelenberg dkk, 1992)

Selain gen pqq, Babu-Khan (1995), juga menemukan gen yang berperan dalam mekanisme pelarutan mineral fosfat yang kemudian disebut dengan gen gabY. Diketahui bahwa gen gabY mempunyai peran alternatif dalam ekspresi dan atau regulasi jalur oksidasi langsung pada *Pseudomonas cepacia*. Meskipun mempunyai peran yang sama dengan gen pqq dalam jalur oksidasi

langsung akan tetapi gen *gabY* tidak memiliki *homology* dengan sekuen gen *pqq*. Gen *gabY* yang berhasil diisolasi dari *Ps.cepacia* kemudian di *cloning* dan dimasukkan kedalam *Escherichia coli* JM109. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kehadiran gen *gabY* mampu menginduksi pembentukan asam glukonat sepuluh kali lebih banyak dibandingkan *E.coli* yang membawa gen *pqq*. Meskipun demikian regulasi genetik pada gen *gabY* juga masih belum diketahui secara jelas, informasi terkait regulasi genetik dalam jalur oksidasi langsung masih terbatas.

Gen lainnya yang juga memiliki peran dalam pelarutan mineral fosfat adalah *pKKY* yang diisolasi dari *Enterobacter agglomerans* (Kim dkk, 1997) yang diketahui mampu melarutkan mineral fosfat dan *pKG3791* yang diisolasi dari *Serratia marcescens* (Krishnaraj dan Goldstein, 2001) yang mampu menginduksi pembentukan asam glukonat pada jalur oksidasi langsung.

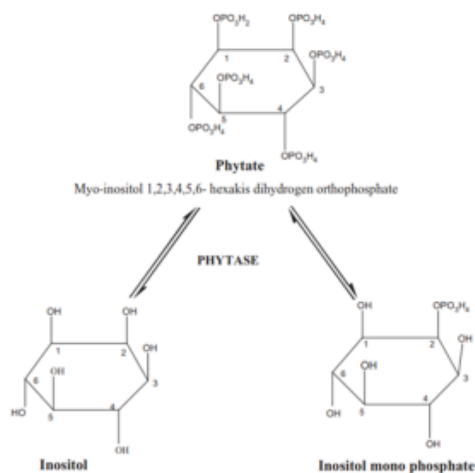
6.3 Genetik Pelarutan Fosfat Organik

Fosfor dari senyawa organik di dalam tanah dapat dilepaskan dengan bantuan tiga kelompok enzim yaitu (1) Fosfatase nonspesifik (*Acid phosphatase*), yang melakukan defosforilasi ikatan fosfo-ester atau fosfo-hidrida di dalam bahan organik, (2) *Vitase*, yang secara spesifik menyebabkan pelepasan P dari asam fitat, dan (3) *Fosfonatase* dan C-P Lase, enzim yang melakukan pembelahan C-P pada organofosfat. Dari ketiga jenis enzim tersebut *acid phosphatase* dan *vitase* mempunyai aktivitas yang paling utama karena keberadaan substratnya yang dominan di dalam tanah (Rodríguez dkk, 2006).

Dasar regulasi genetik pelarutan fosfat belum diketahui dengan jelas. Produksi asam organik dianggap sebagai suatu mekanisme utama dalam pelarutan mineral fosfat. Sehingga dapat diasumsikan bahwa setiap gen yang terlibat dalam sintesis asam organik mungkin berpengaruh pada karakter pelarutan fosfat (Ahmed dan Shahab, 2009). Beberapa gen *acid phosphatase* dari bakteri Gram negatif telah diisolasi dan dikarakterisasi di antaranya yaitu, gen *acpA* yang diisolasi dari *Francisella tularensis* mengekspresikan *acid phosphatase* yang bekerja optimal pada pH 6, dengan berbagai spesifisitas substrat (Reilly dkk, 1996). Selanjutnya, gen yang mengkode *acid phosphatase* nonspesifik kelas A (*PhoC*) dan kelas B (*NapA*) yang diisolasi dari *Morganella morganii* sangat menjanjikan. Kedua gen tersebut menunjukkan aktivitas *vitase*

ekstraseluler tertinggi, dan filtrat kultur yang diencerkan dari strain ini mampu merangsang pertumbuhan bibit jagung di bawah kondisi fosfat yang terbatas dikarenakan adanya fitat (Idris dkk, 2002). Gen lainnya pada rizobakteri yaitu gen yang diisolasi dari *Burkholderia cepacia* dapat memfasilitasi aktivitas fosfatase (Rodriguez dkk., 2000). Gen ini mengkode protein membran luar yang meningkatkan sintesis tanpa adanya fosfat terlarut dalam medium, dan dapat terlibat dalam transpor P ke sel. Selain itu, kloning dua gen *acid phosphatase* periplasmik nonspesifik (napD dan napE) dari *Rhizobium* (*Sinorhizobium*) meliloti telah berhasil dilakukan (Deng, dkk., 1998, 2001).

Vitase merupakan enzim yang berperan dalam degradasi fitat sehingga mampu melepaskan fosfat yang terkandung di dalamnya. Kemampuan tanaman dalam menyerap fosfat secara langsung yang terkandung dalam fitat sangat terbatas sehingga membutuhkan bantuan enzim vitase untuk melepaskannya. Vitase adalah enzim fosfohidrolitik yang secara kimia dikenal sebagai myoinositol (1,2,3,4,5,6) *hexakisphosphate phosphohydrolase*. Vitase meneginisiasi penghapusan gugus fosfat secara bertahap dari myo-inositol hexakis fosfat. Enzim vitase kemudian memisahkan gugus ortofosfat dari cincin inositol asam fitat untuk menghasilkan P anorganik bebas bersama dengan rantai ester fosfat rendah (inositol pentafosfat menjadi inositol monofosfat) sebagai intermediet (gambar 6.4).



Gambar 6.4: Skema Kerja Enzim Vitase

Gen penyandi enzim vitase (phyA) pertamakali diisolasi dari *Aspergillus niger* var. Awamori oleh Piddington dkk (1993) dengan panjang sekuens 1508bp yang menghasilkan polipeptida dengan 467 asam amino. Ricardhson (1994)

telah membuktikan bahwa tanaman *Arabidopsis* yang ditransformasikan dengan gen vitase (phyA) dari *Aspergillus niger* mampu meningkatkan secara signifikan pertumbuhan dan nutrisi fosfat pada *Arabidopsis* yang disuplai dengan fitat. Hal ini menunjukkan bahwa ada peran dari gen phyA yang bekerja dalam membantu tanaman tersebut untuk menyerap unsur fosfat yang ada di dalam fitat.

6.4 Isolasi dan Karakterisasi Gen Penyandi Acid Phosphatase

Gen acid fosfatase telah diisolasi dan dikarakterisasi pada banyak organisme, termasuk bakteri, jamur, tanaman, dan hewan. Acid fosfatase adalah famili enzim yang mengkatalisis hidrolisis ester fosfat dalam kondisi asam, melepaskan fosfat anorganik. Enzim ini memainkan peran penting dalam berbagai proses biologis, termasuk metabolisme, pensinyalan, dan daur ulang fosfat (Kaur dan Subramanian, 2017). Salah satu pendekatan untuk mengisolasi gen acid phosphatase melibatkan pencarian sekuens homolog dalam basis data genom atau transkriptom. Sebagai contoh, dalam studi *acid phosphatase* pada *Bacillus subtilis* yang disebutkan sebelumnya, para penulis menggunakan alat bioinformatika untuk mengidentifikasi gen *acid fosfatase* yang diduga dalam genom *Bacillus subtilis*. Mereka kemudian melakukan analisis fungsional untuk mengonfirmasi aktivitas dan spesifisitas enzim-enzim tersebut, serta menyelidiki regulasi dan peran fisiologisnya (Schmid dkk, 2016). Selain pendekatan bioinformatika, gen acid fosfatase juga dapat diisolasi dengan menggunakan teknik biologi molekuler seperti PCR dan kloning. Sebagai contoh, dalam studi gen *acid phosphatase* dari *Penicillium funiculosum* yang disebutkan sebelumnya, penulis menggunakan PCR untuk mengamplifikasi gen dari DNA genom, kemudian mengkloning produk yang telah diamplifikasi ke dalam vektor plasmid untuk pengurutan dan analisis lebih lanjut (Santos dkk, 2017). Setelah gen *acid phosphatase* diisolasi dan diurutkan, gen tersebut dapat dikarakterisasi lebih lanjut dengan menggunakan berbagai teknik. Sebagai contoh, pola ekspresi gen dapat dipelajari di bawah kondisi pertumbuhan yang berbeda atau dalam jaringan atau jenis sel yang berbeda. Aktivitas enzimatis dan spesifisitas substratnya dapat diuji dengan menggunakan berbagai metode biokimia. Struktur dan fungsinya dapat

diselidiki dengan menggunakan teknik biologi struktural seperti kristalografi sinar-X atau spektroskopi NMR (4rames dan Reddy, 2017). Secara keseluruhan, isolasi dan karakterisasi gen *acid phosphatase* merupakan bidang penelitian yang penting dengan banyak aplikasi potensial seperti dalam peningkatan hasil (Ghosh dan Majumder, 2016).

Salah satu penelitian yang menyelidiki keanekaragaman gen penyandi *acid phosphatase* pada mikroorganisme dilakukan oleh Wang dkk (2015). Para peneliti menganalisis gen pengkode *acid phosphatase* dalam 368 genom bakteri dan mengidentifikasi beberapa famili *acid phosphatase* yang berbeda, termasuk famili *alkaline phosphatase-like* (PhoX), famili *Histidine Acid Phosphatase* (HAP), dan famili *Purple Acid Phosphatase* (PAP). Studi ini menemukan bahwa famili PhoX dari *fosfatase* asam adalah yang paling umum dalam genom bakteri yang dianalisis, dan bahwa enzim ini paling sering dikaitkan dengan perolehan dan metabolisme fosfor. Famili HAP *acid phosphatase* ditemukan terlibat dalam proses biologis yang lebih luas, termasuk virulensi, penginderaan kuorum, dan akuisisi besi. Secara keseluruhan, studi oleh Wang dkk (2015) menyoroti keragaman gen pengkode *acid phosphatase* dalam mikroorganisme dan pentingnya mereka dalam berbagai proses biologis.

Gen pengkode *acid phosphatase* telah diidentifikasi dalam berbagai mikroorganisme, termasuk bakteri, jamur, dan protozoa. Pada bakteri, gen ini sering ditemukan pada Pho regulon, sekumpulan gen yang terlibat dalam pengaturan metabolisme fosfat. *Acid phosphatase* pada bakteri diketahui penting untuk perolehan fosfat dari sumber organik, seperti fitat dan nukleotida, serta untuk degradasi senyawa yang mengandung fosfat intraseluler selama periode pembatasan fosfat. Salah satu penelitian yang menyelidiki keanekaragaman gen penyandi *acid phosphatase* pada jamur dilakukan oleh Lang dkk (2016). Para peneliti menganalisis genom dari 41 spesies jamur dan mengidentifikasi beberapa famili *fosfatase* asam, termasuk famili HAP, famili PAP, dan famili mirip *acid phosphatase* ungu (PAL). Studi ini menemukan bahwa keluarga HAP adalah yang paling tersebar luas dalam genom jamur yang dianalisis dan enzim ini sering terlibat dalam pemanfaatan sumber fosfor organik. Studi ini juga mengidentifikasi sejumlah gen *acid phosphatase* yang unik untuk spesies jamur tertentu, menunjukkan bahwa enzim ini mungkin memainkan peran khusus dalam metabolisme organisme ini. Secara keseluruhan, studi oleh Lang dkk (2016) menyoroti pentingnya gen

pengkode acid phosphatase dalam metabolisme jamur dan keanekaragamannya di berbagai spesies.

Acid phosphatase adalah enzim yang terlibat dalam hidrolisis ester fosfat dalam kondisi asam. Di rizosfer, mikroorganisme menggunakan fosfatase asam untuk mengakses dan memperoleh fosfat dari senyawa organik yang ada di dalam tanah. Enzim ini sangat penting untuk pertumbuhan dan nutrisi tanaman, dan gen penyandinya telah dipelajari secara ekstensif di berbagai spesies mikroba. Salah satu contoh spesies mikroba di rizosfer yang telah dipelajari gen asam fosfatase adalah bakteri *Pseudomonas fluorescens*. Dalam sebuah studi oleh Rodriguez dkk (2006), para peneliti mengisolasi dan mengkarakterisasi gen *acid phosphatase* dari *P. fluorescens* strain F113. Mereka menemukan bahwa gen, yang ditunjuk sebagai *phoC*, menyandikan protein dengan berat molekul sekitar 44 kDa. Para peneliti juga mengidentifikasi beberapa motif yang dilestarikan dalam urutan asam amino dari protein *PhoC* yang merupakan karakteristik dari asam fosfatase. Ini termasuk motif situs aktif RHGXRRP dan HD motif pengikat logam. Mereka juga menemukan bahwa gen *phoC* diatur oleh sistem dua komponen *PhoBR*, yang merupakan sistem pengaturan umum untuk akuisisi fosfat pada bakteri. Selain *P. fluorescens*, gen *acid phosphatase* juga telah dipelajari pada mikroorganisme rizosfer lainnya, termasuk rhizobia dan jamur mikoriza arbuskula. Studi-studi ini telah memberikan wawasan tentang mekanisme mikroorganisme di rizosfer memperoleh dan memanfaatkan fosfat untuk pertumbuhan dan nutrisi tanaman.

Gen penyandi acid phosphatase sering diatur oleh ketersediaan fosfat dalam tanah. Dalam kondisi fosfat rendah, mikroorganisme di rizosfer meningkatkan regulasi gen *acid phosphatase* mereka untuk meningkatkan kemampuan memperoleh fosfat dari sumber organik. Selain *Pseudomonas fluorescens*, gen *acid phosphatase* juga telah diidentifikasi pada spesies mikroba lain di rizosfer, termasuk *Burkholderia*, *Bacillus*, dan *Streptomyces*. Gen-gen ini seringkali sangat lestari di antara spesies yang berbeda dan menyandikan protein dengan urutan asam amino dan motif fungsional yang serupa. Ekspresi gen *acid phosphatase* sering diatur oleh jaringan pensinyalan kompleks yang melibatkan banyak protein dan jalur pengatur. Misalnya, pada beberapa spesies rhizobial, sistem *PhoBR* mengatur ekspresi gen *phoC*, sementara pada spesies lain, sistem pengaturan alternatif seperti sistem *PhoPQ* terlibat. Dalam beberapa tahun terakhir, studi tentang gen yang mengkode acid phosphatase di rizosfer telah difokuskan pada pemahaman perannya dalam interaksi tanaman-

mikroba dan siklus nutrisi. Mikroorganisme penghasil fosfatase asam telah terbukti meningkatkan pertumbuhan tanaman dan penyerapan nutrisi dalam berbagai tanaman, dan karenanya sangat menarik untuk pertanian berkelanjutan. Secara keseluruhan, studi gen *acid phosphatase* di rizosfer telah memberikan wawasan penting ke dalam mekanisme di mana mikroorganisme memperoleh dan memanfaatkan fosfat untuk pertumbuhan dan metabolisme, dan memiliki aplikasi potensial dalam pengelolaan pertanian dan lingkungan.

Bab 7

Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat

7.1 Pendahuluan

Fosfat (P) memainkan peran penting pada hampir semua proses metabolisme utama, termasuk transfer energi, respirasi, biosintesis makromolekul, serta fotosintesis. Namun ketersediaannya terbatas di dalam tanah, sehingga sulit bagi tanaman untuk menyerapnya. Sekitar 95-99% fosfat dalam bentuk tidak larut, tidak bergerak, atau bahkan bergerak lambat di dalam tanah, dan diendapkan. Tanaman menyerap fosfat dalam bentuk ion ortofosfat (H_2PO_4^-) dan ion ortofosfat sekunder (HPO_4^{2-}) (Anand, Kumari & Mallick, 2016). Populasi mikroba di daerah rizosfer mencapai 10-100 kali lebih banyak dibandingkan daerah non rizosfer. Daerah rizosfer melepaskan metabolit sekunder yang dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme sebagai sumber energi dalam mencukupi dan merangsang pertumbuhannya.

Alternatif dalam mengatasi rendahnya fosfat yang tersedia dalam tanah serta cara untuk meningkatkan efisiensi pemupukan fosfat pada tanaman dapat dilakukan dengan pemanfaatan mikroba pelarut fosfat. Mikroba pelarut fosfat berperan utama dalam menyediakan fosfat yang sebelumnya terikat (tidak tersedia) menjadi tersedia bagi tanaman sehingga dapat dengan mudah diserap

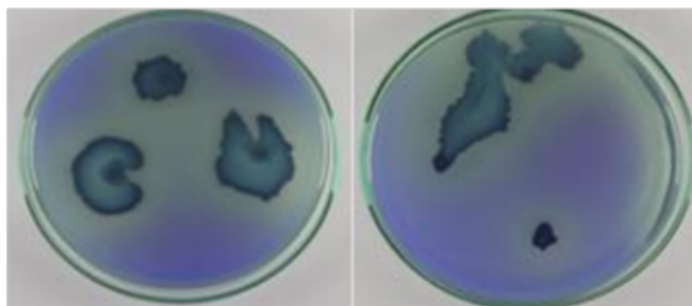
oleh tanaman. Mikroba pelarut fosfat memiliki kemampuan dalam memproduksi asam sitrat, asam suksinat, enzim fosfatase dan vitase, pengkhelet ion siderofor yang dapat diakses oleh tanaman (Amri et al., 2022). Semakin maraknya penelitian yang berfokus pada pemanfaatan mikroba pelarut fosfat dikarenakan berbagai macam kelebihannya antara lain ramah lingkungan, tidak membutuhkan biaya yang besar, efisiensi secara biologis yang tinggi, meningkatkan bioavailabilitas fosfor untuk tanaman, meningkatkan kesuburan tanah, serta memacu pertumbuhan dan meningkatkan produktivitas tanaman sehingga berpotensi besar untuk dikembangkan sebagai pupuk hayati (Bhodiwal & Barupal, 2022).

7.2 Golongan Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Mikroba pelarut fosfat terbagi atas golongan:

1. Bakteri

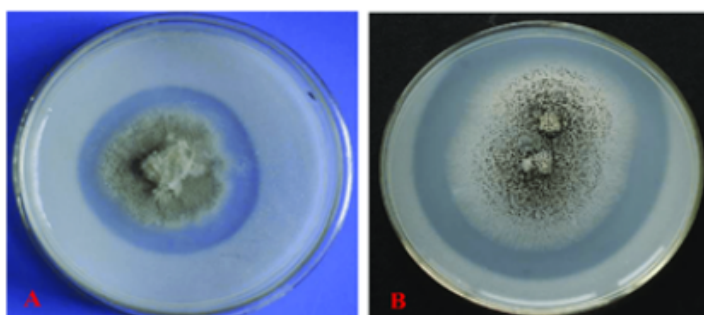
Mikroorganisme yang termasuk dalam kelompok bakteri pelarut fosfat terdiri dari strain *Pseudomonas striata*, *P. diminuta*, *P. fluorescens*, *P. cerevisia*, *P. aeruginosa*, *P. putida*, *P. denitrificans*, *P. rathonis*, *Bacillus polymyxa*, *B. laevolacticus*, *B. megatherium*, *Thiobacillus sp.*, *Mycobacterium*, *Micrococcus*, *Flavobacterium*, *Escherichia freundii*, *Cunninghamella*, *Brevibacterium spp.*, *Serratia spp.*, *Alcaligenes spp.*, *Achromobacter spp.*, dan *Thiobacillus sp.* Bakteri endofit strain *Gluconobacter cerinus*, *Acinetobacter soli*, *Achromobacter xylosoxidans* dan *Bacillus thuringiensis* berpotensi sebagai bakteri pelarut fosfat (Berza et al., 2022). *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Rhizobium*, *Aspergillus*, dan *Penicillium* merupakan bakteri pelarut fosfat yang paling efektif untuk meningkatkan bioavailabilitas fosfat dalam tanah (Timofeeva, Galyamova & Sedykh, 2022).



Gambar 7.1: Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) yang Membentuk Zona Bening (Sudewi et al., 2020)

2. Cendawan/Fungi

Mikroorganisme yang tergolong cendawan pelarut fosfat yaitu *Aspergillus*, ⁵*Penicillium*, *Talaromyces aurantiacus*, *Aspergillus neoniger*, *Aspergillus niger*, *Aspergillus awamori*, *Penicillium digitatum*, *Penicillium bilaji*, *Fusarium*, *Sclerotium*, *Aspergillus niger* dan masih banyak lagi strain lainnya. Konsorsium *Burkholderia sp.* dan *Penicillium sp.* merupakan cendawan pelarut fosfat secara positif memengaruhi aktivitas fosfatase, ketersediaan fosfat dalam tanah serta P organik tanah (Fitriatin et al., 2022).

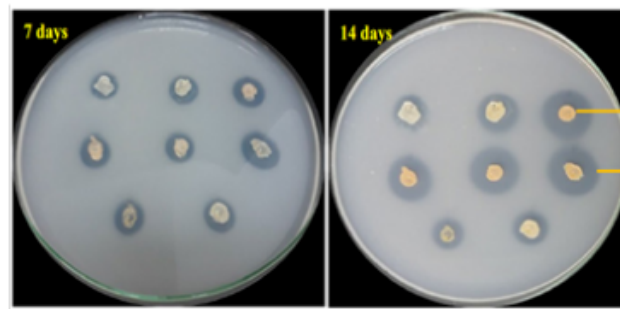


Gambar 7.2: Cendawan/Jamur Pelarut Fosfat *Talaromyces aurantiacus* dan *Aspergillus neoniger* yang membentuk zona bening asal rizosfer tanaman bambu (Zhang, Hu & Ma, 2019)

3. Khamir/Yeast

Rhodospiridium paludigenum JYC100 merupakan khamir merah (red yeast) salah satu kandidat khamir pelarut fosfat yang mampu mengubah senyawa P yang tidak larut menjadi P yang tersedia bagi

tanaman, sehingga merupakan alternatif pengganti potensial pupuk fosfat anorganik untuk memenuhi kebutuhan P tanaman (Chen et al., 2023). *Vishniacozyma victoriae* merupakan jenis khamir yang mampu melarutkan fosfat pada rentang suhu yang luas, tumbuh dalam media yang mengandung debu serta batu, dan menghasilkan asam tartarat dan asam asetat.



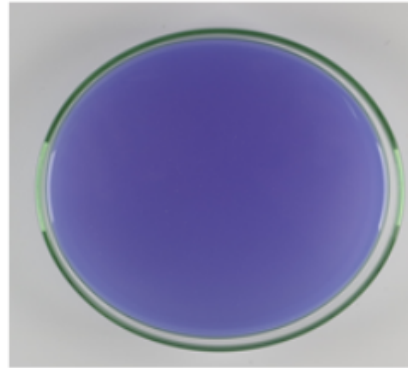
Gambar 7.3: Khamir Pelarut Fosfat yang membentuk zona bening asal lumut Antartika (da Silva et al., 2022)

7.3 Produksi Inokulan ¹ Mikroba Pelarut Fosfat

Produksi inokulan mikroba pelarut fosfat dapat menggunakan bentuk biakan sebagai berikut:

7.3.1 Biakan Agar

Biakan agar merupakan salah satu media yang biasa digunakan untuk menumbuhkan dan mengembangbiakan mikroba. Biakan agar ini terdiri dari komposisi bahan berbeda tergantung dari jenis mikroorganisme yang akan diseleksi. Untuk memproduksi inokulan mikroba pelarut fosfat pada umumnya ⁷ seleksi dengan menumbuhkan mikroba menggunakan media agar padat Pikovskaya. Media ini merupakan media selektif yang digunakan untuk mengisolasi dan menguji mikroba pelarut fosfat.



Gambar 7.4: Media Agar Pikovskaya Padat yang Ditambahkan Bromophenol Blue (Dokumentasi pribadi Sudewi, 2020)

Proses pembuatan media Pikovskaya agar padat untuk bakteri pelarut fosfat memerlukan bahan-bahan sebagai berikut: agar-agar plain sebanyak 15 gram, glukosa 10 gram, sebanyak 5 gram $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0,5 gram, NaCl 0,2 gram, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,1 gram, yeast ekstrak 0,5 gram, sebanyak 0,2 gram KCl, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,002 gram serta $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,002 g gram, 1 liter air steril/aquadest (Larasati et al., 2018; Sugianto, Shovitri & Hidayat, 2019).

Kelebihan dan kekurangan dalam metode biakan agar yaitu:

1. Biayanya lebih terjangkau karena tidak membutuhkan peralatan penyimpanan khusus
2. Metode ini biasanya digunakan untuk jumlah koleksi strain mikroba yang terbatas, sehingga efisien dalam tenaga kerja dan waktu selama kegiatan penyimpanan
3. Koleksi strain mikroba pelarut fosfat dapat terjaga viabilitasnya asalkan proses pengerjaannya betul-betul secara aseptik dengan pengawasan yang lebih baik

Kekurangan metode ini yaitu:

1. Rentan terjadinya mutasi maupun perubahan variasi
2. Karakter fisiologis dan morfologinya dapat berubah seiring dengan terjadinya mutasi
3. Rentan kehilangan patogenitasnya
4. Mudah terkontaminasi, jika sudah terdapat debu ataupun udara yang berterbangan

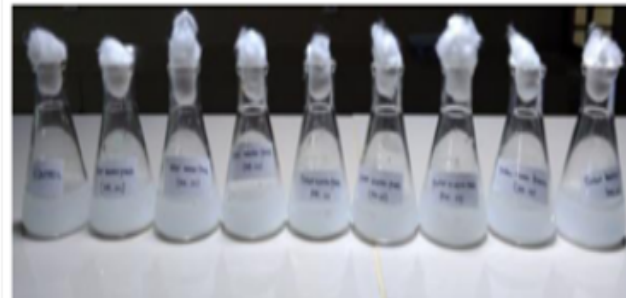
5. Membutuhkan pengawasan yang lebih intens

7.3.2 Biakan Cair

Berbeda dengan biakan padat, media biakan cair dibuat tanpa penambahan agar-agar. Bahan yang diperlukan dalam pembuatan biakan ini sama dengan komposisi bahan dalam pembuatan media pikovskaya padat. Media ini dapat digunakan untuk menumbuhkan mikroba pelarut fosfat dalam bentuk biakan cair. Metode biakan cair ini dapat dilakukan bila mikroba pelarut fosfat tidak dapat tumbuh pada biakan agar (media agar Pikovskaya padat), tetapi mampu tumbuh pada media biakan cair (kultur cair). Faktor penentu keberhasilan dalam kultur mikroba yaitu seri pengenceran yang digunakan. Pengenceran yang semakin tinggi akan berpeluang memperoleh suatu sel mikroba.

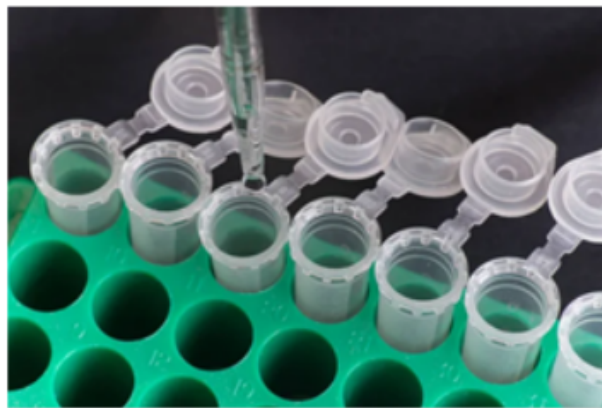


Gambar 7.5: Media Pikovskaya Cair (a) (Dokumentasi pribadi Sudewi, 2020)



Gambar 7.6: Media Pikovskaya Cair (b) (Nuraisya, Yosep Soge Pata'dungan & Uswah Hasanah, 2020)

Untuk memproduksi inokulan mikroba pelarut fosfat yang dapat disimpan dalam jangka pendek/sedang atau sebagai alternatif pendamping dalam penyimpanan jangka panjang serta dapat tersedia ketika akan digunakan, dapat memilih metode penyimpanan biakan cair dengan aquadest steril. Prosedur pelaksanaan dalam metode ini dimulai dengan strain mikroba yang akan digunakan dikulturkan dalam media yang berisi aquadest steril kemudian diinkubasikan pada suhu 10-150C. Namun metode ini memiliki beberapa kelemahan yaitu tidak semua jenis strain mikroba dapat disimpan dengan cara penyimpanan tersebut, pelung tumbuh mikroba lambat, berpeluang memungkinkan untuk terjadinya kontaminasi.

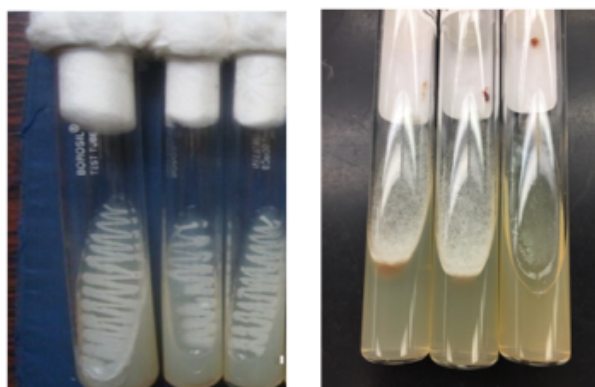


Gambar 7.7: Kultur Strain Mikroba Dalam Biakan Cair (aquadest steril)
(<https://id.depositphotos.com/stock-photos/mikrotube.html>)

Kelebihan dari metode ini yaitu dalam prosesnya tidak membutuhkan peralatan yang mahal atau tempat penyimpanan yang khusus. Isolat mampu bertahan hingga 7 tahun bahkan lebih dan tidak kehilangan patogenitasnya.

7.3.3 Biakan Dengan Minyak Mineral

Salah satu metode sederhana untuk menyimpan biakan inokulan mikroba pelarut fosfat yaitu dengan menggunakan minyak mineral. Minyak mineral yang digunakan dalam bentuk parafin cair ataupun parafin medis dengan gravitasi sebesar 0,830-0,890. Minyak mineral ini berfungsi sebagai bahan penutup dalam biakan mikroba yang dikulturkan dalam media agar miring. Fungsi dari minyak mineral adalah untuk menjaga kelembaban dari medium agar tidak mengering sehingga viabilitas mikroba dapat tetap terjaga sehingga proses peremajaan kultur mikroba dapat diperpanjang hingga beberapa tahun.



Gambar 7.8: Kultur Strain Mikroba Dalam Media Agar Miring
(<https://labmedicineblog.com/2018/07/23/microbiology-case-study-a-49-year-old-with-hiv-and-cns-lymphoma/> (Aruna, Rao & Munawar, 2017))

Mikroba pelarut fosfat yang akan disimpan dikulturkan dalam tabung reaksi yang berisi media pikovskaya padat agar miring. Permukaan medium kemudian ditutup menggunakan minyak mineral dengan ketinggian 10 mm dari permukaan atas koloni dan disimpan pada kulkas dengan suhu 40C. Minyak mineral yang terlalu tinggi ≥ 10 mm maka akan menyebabkan kultur mikroba mati karena oksigen yang berkurang. Ketinggi minyak mineral yang ≤ 10 mm juga akan menyebabkan kultur mikroba akan kehilangan kelembaban dan akhirnya kultur menjadi kering.

Kelebihan dari metode biakan dengan minyak mineral di antaranya yaitu cocok diterapkan pada mikroba pelarut fosfat yang tidak mampu hidup pada metode biakan padat biakan cair, maupun biakan dalam aquadest steril. Prosesnya lebih mudah dan tidak membutuhkan biaya yang besar, biakan dengan metode ini memiliki viabilitas yang tinggi. Kelemahan dari metode ini adalah proses peremajaan mikroba menjadi kotor karena terkena minyak mineral, selain itu proses pengangkutannya kurang praktis karena inokulan disimpan dalam wadah tabung kaca yang mudah sekali pecah, rentan terhadap kontaminasi, mudah mengalami laju pertumbuhan ketika isolat akan disubkultur kembali.

7.3.4 Biakan Kering

Penyimpanan mikroba pelarut fosfat yang akan digunakan dalam produksi inokulan skala komersial salah satunya dapat dilakukan dengan metode biakan kering.

Metode biakan kering dapat dilakukan dengan beberapa bahan yaitu:

1. Penyimpanan Inokulan dengan menggunakan media tanah steril

Suatu inokulan mikroba dapat disimpan pada media tanah atau pasir steril kering yang disimpan pada suhu ruang dengan jangka waktu yang lebih lama. Mikroba yang dapat disimpan pada medium ini adalah jenis mikroorganisme yang membentuk spora seperti *Bacillus spp*, *Rhizobium sp*, *Clostridium spp*, *Streptomycae spp* ataupun fungi yang tergolong dalam family Fusarium. Keunggulan dari metode biakan kering menggunakan tanah/pasir steril adalah mikroba tetap memiliki viabilitas yang baik hingga 10 tahun bahkan lebih, kemampuan patogenitasnya tidak menghilang, proses yang mudah dan murah karena tidak membutuhkan peralatan yang mahal, risiko kontaminasi udara dapat diminimalisir. Sedangkan kekurangan dari metode biakan tanah/pasir steril ini yaitu isolat dapat mengalami perubahan morfologi, fisiologi, serta variasi, metode terbatas hanya cocok bagi mikroorganisme yang membentuk spora (Ilyas, Kanti & Rahmansyah, 2007).

2. Penyimpanan inokulan dalam silika gel anhidrit/manik-manik porselin

Hampir sama dengan penyimpanan inokulan dalam tanah steril, metode penyimpanan biakan inokulan pada silika gel anhidrit tergolong metode yang sederhana dan sesuai bagi mikroba yang mampu membentuk spora. Mikroba akan tetap stabil morfologi maupun viabilitasnya dalam jangka waktu 7-18 tahun setelah disimpan. Adapun kelebihan dari metode penyimpanan inokulan ini tidak memerlukan bahan dan peralatan yang mahal, prosesnya mudah dilakukan, viabilitasnya dan morfologi mikroba tetap stabil, dan bebas gangguan kutu. Selain itu fungsi dari gel silika menjaga kekeringan udara dalam wadah penyimpanan. Sedangkan kekurangannya hanya sesuai bagi mikroba-mikroba yang mampu membentuk spora (Machmud, 2001).

7.3.5 Biakan Kering Beku (Freeze Drying)

Untuk memproduksi inokulan mikroba pelarut fosfat sebagai *biofertilizer* secara komersial, membutuhkan starter kultur mikroba yang dapat tersedia secara terus menerus, dan siap pakai ketika akan digunakan. Kultur mikroba yang siap pakai ini dapat diawetkan dan disimpan dengan metode biakan kering beku atau biasa disebut dengan liofilisasi/*freeze drying*.

Biakan kering beku atau liofilisasi memiliki kelebihan yaitu mudah dikelola, memiliki aktivitas produksi yang tetap tinggi, kultur mikroba yang disimpan bersifat stabil atau tidak mengalami mutasi selama proses penyimpanan. Metode ini banyak digunakan pada kapang, khamir, bakteri maupun virus, begitu pula dengan mikroba pelarut fosfat. Metode liofilisasi merupakan alternatif metode penyimpanan mikroba dalam jangka panjang yang biasa digunakan pada laboratorium atau lembaga yang telah memiliki fasilitas alat yang canggih. Sedangkan untuk metode penyimpanan mikroba jangka pendek dapat menggunakan metode pemindahan kultur secara berkala, penyimpanan dalam minyak mineral, paraffin cair, tanah steril, aquadest steril, lempengan gelatin dan lain sebagainya (Rasyidah & Fariani, 2021).



Gambar 7.9: Mesin Freeze Drying (<https://biobasemeihua.en.made-in-china.com/product/bNwEcJgjwdVy/China-Biobase-China-Freeze-Dryer-Bk-Fd10s-for-Lab.html>)

Freeze drying adalah suatu proses penyimpanan atau pengawetan suatu bahan dengan menggunakan perlakuan kombinasi dari pembekuan dan dehidrasi. Metode *freeze drying* merupakan salah satu cara efektif yang dapat diterapkan pada starter mikroba dengan keuntungannya yaitu kultur mikroba tidak mudah rusak, mikroba menjadi awet tanpa mengalami perubahan struktur, maupun

sifat biologi ataupun kimia. Pada proses ini terdapat matriks es kaku yang akan menjaga integritas suatu produk tetap aman serta menahan komponen padatan dalam bahan sehingga tetap pada kondisinya (Dewi, 2009).

Salah satu faktor yang berpengaruh pada proses liofilisasi adalah jenis medium pembawa yang digunakan. Pemilihan medium pembawa yang tepat akan menjaga viabilitas hidup dari sel mikroorganisme atau melindungi sel selama dan sesudah proses pengeringan beku. Jenis media pembawa yang dapat digunakan yaitu serum, media yang mengandung glukosa (tepung tapioca, tepung beras), sukrosa, skim milk dan lain sebagainya. Proses awal liofilisasi dimulai dengan kultur mikroba dengan media pembawa yang akan dibekukan, diletakkan dalam suatu bejana yang tertutup rapat kemudian di vacuum dan didehidrasi. Pada proses ini air dalam kultur mikroba dibekukan dengan cepat dan secara langsung diubah menjadi uap tanpa melalui fase cair. Proses liofilisasi menghasilkan produk bakteri kering yang stabil secara struktur, dengan viabilitas yang tinggi, teksturnya ringan sehingga tidak membutuhkan ruang yang luas untuk penyimpanan, dapat bertahan hingga jangka lama, serta mudah proses pengangkutannya (Rachmat & Shovitri, 2021).



Gambar 7.10: Strain Bakteri Metode Freezer Drying Yang Disimpan Dalam Ampul Kaca Atau Vial Serum (<https://www.atcc.org/resources/culture-guides/bacteriology-culture-guide>)



Gambar 7.11: Pengeringan Beku Strain Bakteri Dalam Botol Kaca Dengan Volume Yang Berbeda (<https://bccm.belspo.be/news/new-bccmlmg-freeze-drying-bacteria-glass-vials-request>)

Kultur beku-kering dapat disimpan dengan aman pada suhu 4°C atau lebih rendah (Bhatta, Janezic & Ratti, 2020). Untuk dapat digunakan, kultur mikroba yang telah di freeze drying diencerkan pada media biakan lalu diinkubasi pada media yang sesuai dengan jenis mikroba yang dikering bekukan.

7.4 Produksi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat Dengan Bahan Pembawa (Carrier)

Produksi inokulan mikroba memerlukan bahan pembawa (carrier) agar ketahanan hidup inokulan (viabilitasnya) stabil dan keefektifannya terjaga selama proses pengaplikasian maupun dalam masa penyimpanan. Selain itu penggunaan bahan pembawa merupakan salah satu unsur penting dalam menentukan kualitas dari suatu produk pupuk hayati. Bahan pembawa sebagai solusi untuk mengatasi kekurangan dalam memproduksi inokulan formulasi bentuk padat maupun cair. Tujuan dari penginokulasian mikroba dengan menggunakan bahan pembawa yaitu agar terjadi penyesuaian lingkungan hidup inokulan mikroba sebelum diaplikasikan ke tanah. syarat penting sebagai media atau bahan pembawa adalah bahan pembawa harus mengandung komponen yang dapat mendukung ketahanan hidup serta pertumbuhan dan perkembangan mikroba yang diinokulasikan dalam bahan

pembawa tersebut. Berikut beberapa jenis bahan pembawa yang dapat digunakan dalam memproduksi inokulan mikroba khususnya mikroba pelarut fosfat sebagai berikut:

7.4.1 Jerami Padi dan Sekam Padi

Jerami padi merupakan salah satu limbah tanaman padi yang setiap musim tanamnya dapat dihasilkan jerami sebesar 2-9 ton ha⁻¹. Jerami padi pada umumnya digunakan sebagai bahan organik dalam pembuatan kompos setelah mengalami proses dekomposisi. Selain itu pada lahan sawah juga dihasilkan residu pertanian yang berasal dari hasil penggilingan gabah yaitu sekam padi. Produksi sekam dari berat bersih beras yang dihasilkan dapat mencapai 16-21%. Jerami mengandung nutrisi hara dan asam-asam organik, sedangkan sekam padi mengandung 75-90% selulosa dan lignin, mineral silika serta unsur-unsur lainnya. Kandungan nutrisi, mineral dan unsur lainnya yang terdapat pada jerami dan sekam padi dapat dimanfaatkan oleh mikroorganisme dalam aktivitas metabolismenya. Begitu halnya dengan mikroba pelarut fosfat yang diinokulasikan pada media pembawa berupa jerami dan sekam padi, yang mana peran dari media pembawa sebagai sumber energi bagi aktivitas mikroba.

Produksi inokulan mikroba pelarut fosfat dengan bahan pembawa berupa jerami dan sekam padi bertujuan untuk memudahkan pelarutan P dalam tanah serta serapan P pada tanaman menjadi meningkat sehingga pemupukan menjadi lebih efisien. Efektivitas inokulan dari mikroba pelarut fosfat salah satunya ditentukan oleh produksi enzim dari mikroba pelarut fosfat yang terdiri dari enzim fosfatase, nuklease, dan vitase.

Sejalan dengan Citraresmini & Bachtiar, (2016) mengemukakan bahwa bakteri pelarut fosfat (BPF) yang dinokulasikan pada kompos jerami padi, sekam padi yang diolah menjadi biochar mampu menstimulasi pelarutan P yang berada di dalam tanah. Selain itu kompos jerami padi + biochar sekam padi yang diinokulasikan BPF mampu memperbaiki sifat kimia dan biologi tanah. Hal ini terlihat dari adanya peningkatan kandungan C-organik tanah dan jumlah koloni BPF yang dihasilkan. C-organik tertinggi diperoleh dari perlakuan kompos jerami + biochar sekam padi + inokulasi BPF dibandingkan dengan perlakuan aplikasi fosfat alam 163 kg ha⁻¹ + inokulasi BPF.

7.4.2 Limbah Tahu

Bahan yang dihasilkan dari suatu pengolahan produk atau sisa dari suatu tanaman yang tidak dimanfaatkan lagi dan bernilai guna yang rendah disebut dengan limbah. Salah satu limbah organik yang dapat digunakan sebagai bahan pembawa mikroba pelarut fosfat adalah limbah tahu. Limbah tahu cair banyak mengandung unsur P sehingga dapat digunakan sebagai media tumbuh maupun sebagai carrier. Sejalan dengan hasil penelitian Alawiah, Darmayasa & Sundra (2015) penggunaan limbah tahu cair yang ditambahkan dengan Dextrosa sebagai sumber karbon merupakan media tumbuh yang optimum bagi pertumbuhan bakteri pelarut fosfat *Enterobacter gergoviae*.

7.4.3 Gambut

Gambut merupakan jenis tanah yang terbentuk dari sisa-sisa tanaman yang belum melapuk seutuhnya/seluruhnya. Gambut tergolong dalam proses dekomposisi secara anaerobik dalam artian laju penambahan bahan organiknya lebih tinggi jika dibandingkan laju dekomposisinya. Tanah gambut dapat dijadikan sebagai media pembawa karena memiliki karakteristik yang mampu menyimpan air serta gambut kaya akan bahan organik. Gambut memiliki sifat toleran terhadap mikroorganisme. Mikroorganisme mampu hidup dan dapat pula menjadi sumber energi bagi mikroorganisme yang ada (Choirunnisa, Zul & Pratiwi, 2017). Tanah gambut tropis memiliki ciri warna kemerahan hingga coklat gelap tergantung dari proses dekomposisinya. Viabilitas mikroba dapat bertahan selama 30 hari dengan bahan pembawa tanah gambut dan padatan limbah (Noviana & Raharjo, 2009).

7.4.4 Tandan Kosong Kelapa Sawit

Tandan kosong kelapa sawit (TKSS) sangat berpotensi dan banyak digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan kompos maupun sebagai mulsa. Tandan kosong ini merupakan limbah sampingan dari buah kelapa sawit. Namun pemanfaatan TKSS sebagai kompos membutuhkan waktu dekomposisi atau degradasi secara alami $\pm$ 3-6 bulan. Proses dekomposisi yang lambat ini disebabkan karena TKSS mengandung lignin sekitar 34,47% dan rasio C/N sekitar 45-55% serta adanya polimer selulosa sehingga menjadi penghalang dalam proses biodegradasi secara alami (Sapareng & Amir, 2022).

TKSS dapat digunakan sebagai bahan pembawa dalam produksi inokulan suatu mikroba. Proses dekomposisi TKSS dapat berlangsung lebih cepat

dengan penambahan inokulan mikroba. Sejalan dengan penelitian Sapareng & Amir (2022) bahwa penambahan inokulan mikroba *Trichoderma* sp mampu mempercepat proses pengomposan, meningkatkan sifat fisik dan kimia tanah serta mampu meningkatkan kandungan hara yang terdapat dalam kompos tersebut. Pemanfaatan inokulan mikroba pelarut fosfat dengan bahan pembawa TKSS berfungsi dalam membantu penyediaan unsur P dalam tanah (Ichriani, Fahrussyah & Handayanto, 2018).

7.4.5 Eceng Gondok

Peran media pembawa dalam produksi inokulan mikroba sangatlah penting, karena merupakan indikator kualitas dari produk pupuk hayati yang akan dihasilkan. Salah satu media pembawa inokulan mikroba pelarut fosfat adalah eceng gondok. Eceng gondok meruoakan jenis tanaman yang pertumbuhannya sangat cepat, kadang kala dianggap sebagai gulma air karena dampaknya yang merugikan. Dampak tersebut adalah berkurangnya produktivitas badan air, karena terjadi kompetisi dalam ruang maupun unsur hara pada budidaya perikanan. Kandungan unsur hara dalam eceng gondok yaitu bahan organik sebesar 78,47%, kandungan C-Organik 21,23%, N-total 0,28%, kandungan P dan K masing-masing 0,0011% dan 016% (Pramesti & Hermiyanto, 2019).

Inokulasi mikroba pelarut fosfat pada media pembawa berupa eceng gondok yang dicampur dengan kotoran sapi padat kering berdasarkan hasil penelitian Sondang, Anty & Siregar (2020) mampu memengaruhi kualitas dari pupuk organik hayati yang dihasilkan yaitu melimpahnya keberadaan mikroba dan populasi mikroba menjadi meningkat.

7.4.6 Tepung Tapioka dan Talk Powder

Tepung tapioka dan talk powder merupakan salah satu formula bahan pembawa dalam suatu produksi inokulan mikroba. Tepung tapioka merupakan hasil olahan dari tanaman singkong yang mudah diperoleh, bersifat ekonomis serta memiliki kandungan karbohidrat yang tinggi. Sedangkan talk powder adalah sediaan yang berbentuk serbuk halus yang mengandung bahan mineral dengan fungsi menyerap kelembaban.

Kedua bahan pembawa ini mampu mempertahankan umur simpan dari mikroba, mempertahankan viabilitas dan daya antagonis dari mikroba agar tetap stabil, serta mempermudah dalam proses penggunaan maupun pengaplikasian produk inokulan mikroba. Sifat fisik dari tepung tapioka yaitu

memiliki tingkat kelarutan yang lebih tinggi serta endapan yang rendah. Hal ini karena bahan pembawa tepung tapioka memiliki karakteristik tekstur yang halus sehingga lebih mudah larut dalam air serta daya serap airnya lebih besar. Berbeda halnya dengan talk powder yang memiliki sifat fisik tingkat kelarutan yang lebih rendah (Khaeruni et al., 2022). Penggunaan bahan pembawa talk powder berdasarkan penelitian Harni & Samsudin (2015) mampu menekan populasi dari nematoda *Meloidogyne* sp. pada tanaman kopi. Selain itu Muis, Djaenuddin & Nonci (2016) juga mengemukakan bahwa talk powder mampu menekan perkembangan dari *Rhizoctonia solani* penyebar hawar pelepah daun pada tanaman jagung. Ukuran partikel dari talk powder yang kecil mudah untuk menyebar sehingga ketika disebarkan dalam larutan air yang berbentuk suspensi akan mudah terikat dengan larutan mikroba yang ada.

1

Bab 8

Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan

8.1 Pendahuluan

2

Fosfor merupakan unsur hara terpenting kedua bagi pertumbuhan tanaman setelah nitrogen. Namun, ketersediaan unsur tersebut di dalam tanah sangatlah terbatas karena berada dalam keadaan berikatan dengan koloid tanah, sedangkan tanaman hanya bisa menggunakan dalam bentuk fosfat anorganik. Mikroba pelarut fosfat (MPF) dapat melarutkan fosfat dari ikatan fosfat tak larut melalui sekresi asam-asam organik atau dengan cara mineralisasi fosfat dari bentuk ikatan fosfat organik menjadi fosfat anorganik, sehingga fosfat bisa langsung diserap oleh tanaman. Kemampuan MPF dalam membantu pertumbuhan tanaman sangat tergantung dari jenis, kemampuan melarutkan fosfor, daya adaptasi, dan kemampuan hidup pada lingkungan yang berbeda. Pada bab 8 ini menjelaskan tentang teknik aplikasi MPF, faktor yang memengaruhi keberhasilan dan masa hidup inoculan MPF, dan faktor yang memengaruhi kegagalan aplikasi inoculan MPF di lapangan.

8.2 Teknik Aplikasi Mikroba Pelarut Fosfat

Pelarutan unsur hara fosfor oleh mikroba merupakan proses penting dalam ekosistem alam terutama tanah pertanian. Beberapa jenis mikroba yang mampu melarutkan fosfat yaitu bakteri, fungi dan aktinomisetes. Beberapa genus bakteri yang mampu melarutkan fosfat yaitu *Pseudomonas*, *Agrobacterium*, *Bacillus*, *Azotobacter*, *Burkholderia*, *Enterobacter*, *Erwinia*, *Kushneria*, *Paenibacillus*, *Ralstonia*, *Rhizobium*, *Rhodococcus*, *Serratia*, *Bradyrhizobium*, *Salmonella*, *Sinomonas* dan *Thiobacillus*. Beberapa genus dari fungi yaitu *Achrothcium*, *Alternaria*, *Arthrobotrys*, *Aspergillus*, *Cephalosporium*, *Cladosporium*, *Curvularia*, *Cunninghamella*, *Chaetomium*, *Fusarium*, *Glomus*, *Helminthosporium*, *Micromonospora*, *Mortierella*, *Myrothecium*, *Oidiodendron*, *Paecilomyces*, *Penicillium*, *Phoma*, *Pichia fermentans*, *Populospora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Rhizopus*, *Saccharomyces*, *Schizosaccharomyces*, *Schwanniomyces*, *Sclerotium*, *Torula*, *Trichoderma*, dan *Yarrowia* (Dandessa dan Bacha, 2018). Beberapa jenis dari aktinomisetes yaitu *Streptomyces albobiridis*, *Streptomyces griseorubens*, *Nocardiaopsis alba*, *Streptomyces bellus*, dan *Streptomyces enissocaesilis* (Aallam et al., 2021; Boubekri et al., 2021).

Aplikasi MPF dapat dilakukan dengan berbagai cara seperti menggunakan isolat tunggal ataupun dengan cara dikonsorsiumkan. Konsorsium mikroba merupakan penggunaan dua atau lebih mikroba, yang mana dapat dilakukan antar bakteri, antar fungi, maupun kombinasi keduanya. Konsorsium akan membentuk suatu komunitas yang mempunyai hubungan kooperatif, komensalisme dan mutualisme. Pada saat aplikasi di lapangan konsorsium mikroba lebih efektif dibandingkan dengan isolat tunggal, hal ini berkaitan dengan jumlah metabolit sekunder dan enzim yang dihasilkan oleh mikroba. Irawan dan Zulaika (2016), melaporkan bahwa konsorsium *Azotobacter* menghasilkan fosfat terlarut yang lebih tinggi dibandingkan dengan isolat tunggal.

Aplikasi MPF juga sering dalam bentuk produk yang sudah jadi atau dikenal sebagai pupuk hayati. Pupuk hayati merupakan formulasi dari inokulan berbasis bahan pembawa (carrier) yang mengandung mikroba efektif seperti MPF. Pembuatan formulasi dalam pupuk hayati bertujuan agar mikrob mudah diaplikasikan, serta meningkatkan daya hidup sel dengan cara melindunginya

dari kekeringan. Swandi et al., (2019), melaporkan bahwa aplikasi mikroba dalam bentuk inoculan cair tanpa adanya formulasi ditemui adanya kendala dalam hal pengemasan dan penyimpanan jika akan digunakan dalam skala luas. Shabrina (2011), menyatakan bahwa bahan pembawa (carrier) dalam formulasi pupuk hayati berperan penting dalam memfasilitasi kerja mikroba fungsional agar bermanfaat bagi tanah dan tanaman. Selain itu, bahan pembawa juga bertujuan agar inoculan mikroba dapat menyesuaikan lingkungan hidupnya sebelum diberikan ke tanah. Bahan pembawa yang umum digunakan pada proses formulasi berupa bahan organik seperti gambut, arang, dan kompos atau bahan anorganik seperti talek, zeolit, kaolinit, monmorilonit, pyropilit, dan vermikulit.

Pemanfaatan MPF sebagai pupuk hayati dilakukan dengan cara menginokulasi tanah secara langsung pada tanaman benih atau diberikan ke biji. Inokulasi biasanya dilakukan pada saat tanam yang bersamaan dengan pemupukan fosfat. Pada tanah-tanah yang kandungan P tinggi akibat akumulasi atau residu pemberian pupuk fosfat yang menumpuk, maka MPF digunakan sebagai penambang fosfat dari tanah-tanah tersebut, sehingga dapat meningkatkan kelarutan P dari pupuk yang diberikan maupun senyawa P yang berasal dari residu pemupukan sebelumnya di dalam tanah (Simanungkalit et al., 2006).

Hasil aplikasi MPF yang lebih baik ketika jenis mikroba yang digunakan tidak hanya memiliki satu kemampuan saja seperti melarutkan fosfat, namun mikroba tersebut juga memiliki kemampuan lain yang mendukung pertumbuhan tanaman seperti penambat nitrogen, menghasilkan hormon *Indole Acetic Acid* (IAA), mampu melarutkan kalium, mampu berkompetisi, menghasilkan antimikroba, dan lain-lain. Mikroba tersebut jika diformulasikan membentuk pupuk hayati maka disebut sebagai pupuk hayati majemuk yaitu pupuk yang mengandung konsorsium mikroba fungsional (memiliki kemampuan lebih dari satu). Beberapa penelitian terakhir yang mengkaji aplikasi mikroba sebagai pupuk hayati tanaman disajikan pada Tabel 8.1.

Tabel 8.1: Kajian Pustaka Teknik Aplikasi Mikroba sebagai Pupuk Hayati Tanaman

Teknik Aplikasi	Jenis & Kemampuan Mikroba	Hasil Penelitian	Pustaka
Formulasi dalam bentuk tepung dengan komposisi 50 g talek, 1 g pepton, 0,5 g CMC,	Konsorsium <i>Burkholderia cepacia</i> , <i>Serratia marcescens</i> , dan <i>Bacillus</i>	Aplikasi pupuk hayati berpengaruh sangat nyata terhadap tinggi tanaman,	Swandi et al., 2019

1,5 g sukrosa teknis, 1 g ekstrak khamir dan 5 ml mikroba konsorsium 4. Cara aplikasi: 10 g formulasi dalam 90 mL akuades steril dan diaplikasikan satu minggu sekali sebanyak 10% pada tanah disekeliling tanaman.	<i>thuringiensis</i> dengan kemampuan melarutkan fosfat, menambat nitrogen dan menghasilkan hormon IAA	jumlah daun, umur berbunga, bobot basah, bobot kering, dan panjang akar tanaman cabai (<i>Capsicum annum</i> L.). Aplikasi pupuk hayati juga terbukti dapat meningkatkan ketersediaan hara P dalam tanah dan mentralkan tanah.	
Formulasi dalam bentuk cair dengan komposisi 80% bahan pembawa (85% air kelapa dan 15% gula) dan 20% mikroba konsorsium. Cara aplikasi: Pupuk hayati cair diaplikasikan 15 hari sebelum tanam dan 15 hari setelah tanam.	Konsorsium <i>Pseudomonas</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Kebsiella</i> , <i>Aspergillus</i> , dan <i>Azotobacter</i> dengan kemampuan melarutkan fosfat, penambat nitrogen dan penghasil enzim selulosa	Aplikasi pupuk hayati berpengaruh nyata terhadap tinggi tanaman, jumlah daun, jumlah batang, dan jumlah bunga tanaman kedelai yang ditanam pada lahan gambut. Pupuk hayati juga terbukti dapat meningkatkan unsur hara tanaman dan hara tanah.	Neneng, 2020
Formulasi dalam bentuk serbuk dengan komposisi 50 gr bahan pembawa (gambut:dolomit:arang = 2:1:1) dan 10 ml konsorsium bakteri.	Konsorsium 3 isolat (L-7, L-9 dan L-11) bakteri <i>Pseudomonas</i> dengan kemampuan	Aplikasi pupuk hayati terbukti mampu melarutkan P di ultisol Lampung dan meningkatkan hasil kedelai 100%.	Suryanti ni, 2016
Formulasi dalam bentuk cair dengan komposisi air kelapa, molase (1%), VCO (0,01%), dan mikroba konsorsium. Cara aplikasi: pada saat pembenihan dengan direndam benih selama	Konsorsium <i>Bacillus cereus</i> strain ATCC 14579, <i>Bacillus subtilis</i> subsp.subtilis strain 168, <i>Bacillus siamensis</i> strain KCTC13613, <i>Azotobacter</i> sp., dan	Aplikasi pupuk hayati cair (PHC) dapat meningkatkan produksi padi sawah sebesar 60% jika dibanding tanpa pemberian PHC.	Yulensri et al., 2021

24 jam, saat tanam dan pada penyiangan ke 2 dengan konsentrasi 20 % (dosis 400L/ha).	<i>Pseudomonas fluorescens</i> dengan kemampuan penghasil enzim kitinase, selulase, protease, penambat nitrogen dan pelarut fosfat.		
Formulasi dalam bentuk butiran dengan komposisi biomassa mikroba:arang sekam:kapur = 1:150:2 (b/b) dan ditambahkan gum arabic 1%. Cara aplikasi: ditebar sekitar perakaran tanaman umur 1 minggu setelah tanam dengan dosis 50g formula per tanaman.	Konsorsium <i>Streptomyces</i> sp. A-SDR01 dan <i>Penicillium</i> sp. F-SKG17 dengan kemampuan melarutkan fosfat.	Aplikasi formulasi terbukti mampu meningkatkan produktivitas dan tinggi tanaman singkong melalui bioaugmentasi tanah dibandingkan dengan kontrol.	Ali <i>et al.</i> , 2020

8.3 Faktor yang Memengaruhi Keberhasilan dan Masa Hidup Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat

Faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan dan masa hidup inokulan MPF yaitu viabilitas mikroba, sinergitas mikroba dan pemilihan bahan pembawa (carrier).

8.3.1 Viabilitas Mikroba

Viabilitas mikroba didefinisikan sebagai kemampuan dan ketahanan mikroba untuk dapat hidup dalam jangka waktu tertentu. Pada penelitian aplikasi mikroba dalam pupuk hayati, uji viabilitas penting untuk dilakukan. Hal ini bertujuan untuk mengamati kestabilan populasi mikroba di dalam bahan pembawa selama masa penyimpanan. Uji viabilitas dapat dilakukan dengan cara menghitung jumlah populasi mikroba pada awal inokulasi ke dalam

formulasi sampai pada waktu yang diinginkan (berkaitan dengan masa penyimpanan). Penghitungan populasi mikroba dapat dilakukan dengan metode *Total Plate Count* (TPC). Hasil da5 uji viabilitas dapat menentukan masa kadaluwarsa suatu pupuk hayati dan persyaratan teknis minimal pupuk hayati yang tercantum dalam Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor: 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Organik, Pupuk Hayati dan Pembenh Tanah (Tabel 8.2).

Hasil penelitian Swandi et al., (2019) menyatakan bahwa populasi bakteri dalam suatu formulasi mengalami penurunan jumlah sel dalam enam bulan masa penyimpanan dengan populasi sel awal (bulan ke-0) sebesar 1,5x109 CFU/g dan menurun hingga 4,1x107 CFU/g pada bulan ke-6. Penurunan jumlah koloni bakteri disebabkan oleh nutrisi yang terkandung dalam formulasi semakin berkurang seiring dengan masa penyimpanan, namun jumlah sel pada bulan ke-6 masih memenuhi batas minimal syarat baku mutu pupuk hayati sehingga dapat disimpulkan bahwa pupuk hayati tersebut memiliki masa kadaluwarsa selama 6 bulan.

Tabel 8.2: Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Hayati (Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor: 261/KPTS/SR.310/M/4/2019)

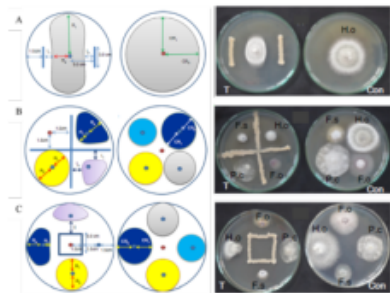
No	Parameter (Jenis Mikroba)	Syarat Teknis sesuai Bentuk Pupuk Hayati	
		Padat	Cair
Pupuk Hayati Tunggal			
1	Bakteri	$\geq 1 \times 10^8$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^8$ CFU/ml
2	Aktinomiset	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/ml
3	Fungi	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/ml
4	Endomikoriza Arbuskular	Jumlah propagul hidup: $\geq 1 \times 10^2$ CFU/g bobot kering contoh	
5	Ektomikoriza	Total fungi: $\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	
Pupuk Hayati Majemuk			
6	Konsorsium Mikroba yang terdiri dari 2 genus, salah satu genus sesuai syarat teknis: a. Bakteri	$\geq 1 \times 10^7$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^7$ CFU/ml

	b. Aktinomiset	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
	c. Fungi	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/ml bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
	Genus kedua sesuai syarat teknis:		
	a. Bakteri	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/ml
	b. Aktinomiset	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
	c. Fungi	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
7	Konsorsium mikroba yang terdiri atas lebih dari 2 genus, salah satu genus sesuai syarat teknis:		
	a. Bakteri	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^6$ CFU/ml
	b. Aktinomiset	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
	c. Fungi	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/ml
	Genus lainnya sesuai syarat teknis:		
	a. Bakteri	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^5$ CFU/ml
	b. Aktinomiset	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^3$ CFU/ml
	c. Fungi	$\geq 1 \times 10^4$ CFU/g bobot kering contoh	$\geq 1 \times 10^3$ CFU/ml

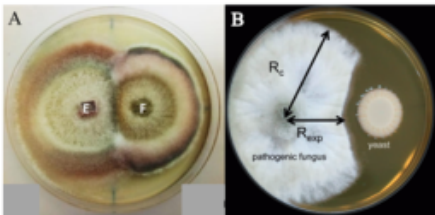
8.3.2 Sinergitas Mikroba

Sinergitas mikroba didefinisikan sebagai kemampuan mikroba untuk bisa bekerjasama atau saling berinteraksi sehingga bisa hidup saling berdampingan. Penelitian aplikasi mikroba konsorsium dalam pupuk hayati mengharuskan mikroba tersebut saling bersinergi, hal ini dapat dibuktikan dengan pengujian antagonisme dengan tujuan melihat sifat antagonis mikroba sehingga tidak merugikan satu sama lain. Kriteria mikroba bisa saling bersinergi yaitu tidak memiliki zona hambat pada saat pengujian antagonisme. Uji antagonisme

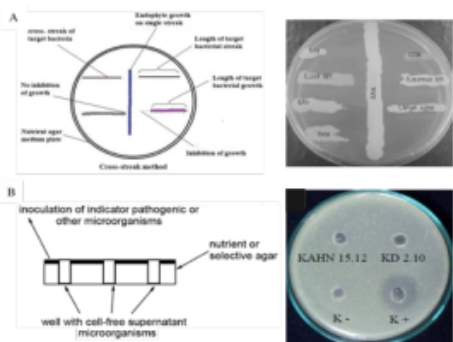
mikroba dapat dilakukan dengan menggunakan metode dual culture, square streak, plus streak dan well diffusion. Uji antagonisme bakteri dengan fungi bisa menggunakan metode dual culture, square streak, dan plus streak (Gambar 8.1). Uji antagonisme antara fungi dengan fungi menggunakan metode dual culture (Gambar 8.2) dan uji antagonisme antara bakteri dengan bakteri menggunakan metode cross streak dan well diffusion (Gambar 8.3).



Gambar 8.1: Metode Uji Antagonisme Antara Bakteri dan Fungi: A. Dual Culture, B. Plus Streaks, dan C. Quare Streak (Anith et al., 2021)



Gambar 8.2: Uji Antagonisme Metode Dual Culture Antar Fungi: A. Tidak Ada Zona Hambat (Hamzah et al., 2018), B. Ada Zona Hambat (Chen et al., 2018)



Gambar 8.3: Metode Uji Antagonisme Antar Bakteri: A. Cross Streak (Veerapagu et al., 2022 dan Lertcanawanichakul dan Sawangnop, 2008), B. dual culture (Fijan, 2016 dan Swandi et al., 2019)

8.3.3 Pemilihan Bahan Pembawa (carrier)

Bahan pembawa (carrier) menjadi faktor penentu keberhasilan inokulan mikroba dalam pupuk hayati karena dapat memengaruhi viabilitas dan efektivitas suatu mikroba. Bahan pembawa dapat menyediakan makanan bagi mikroba dan sebagai tempat hidup sementara sebelum diaplikasikan ke tanah. Menurut Haryanti et al., (2014), salah satu syarat bahan pembawa yang baik adalah steril dari mikrob indigenus sehingga inokulan mampu bertahan hidup tanpa adanya persaingan dengan mikrob indigenus dalam bahan pembawa. Selain itu, tidak bersifat racun terhadap mikrob, mudah menempel pada tanaman, mudah didapat, dan tersedia secara melimpah. Suryantini (2016) menambahkan, bahan pembawa juga harus mudah untuk disterilkan dengan autoklaf atau gamma-iradiasi, meningkatkan umur simpan, dan harganya murah.

Pemilihan bahan pembawa akan menentukan jenis dari pupuk hayati yaitu berupa cair atau padat. Penggunaan bahan pembawa dapat berupa senyawa organik atau anorganik. Beberapa jenis bahan pembawa yang dapat digunakan yaitu biochar, fosfat alam, kaolin, gambut, talek, dedak, serbuk kayu, kompos, zeolit, molase, arang, dan lain-lain. Jenis bahan pembawa tersebut juga bisa dikombinasikan dengan bahan lainnya seperti glukosa, sukrosa, ekstrak khamir, pepton, tripton, CMC, CaCO_3 , dll sebagai tambahan nutrisi untuk mikroba.

Haryanti et al. (2014), menggunakan serbuk gambut dengan campuran fosfat alam dan kapur pertanian sebagai bahan pembawa untuk inokulan konsorsium bakteri pelarut fosfat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa formulasi bahan pembawa tersebut dapat mempertahankan viabilitas sel bakteri hingga 90 hari dengan jumlah sel 1010-1011 CFU/g. (Swandi et al., 2019) menggunakan talek dengan campuran pepton, CMC, sukrosa dan ekstrak khamir sebagai bahan pembawa untuk inokulan konsorsium rizobakteria dengan hasil mampu mempertahankan sel selama 6 bulan dengan jumlah sel 107 CFU/g.

Faktor lainnya yang memengaruhi keberhasilan inokulan mikroba yaitu penggunaan bahan pembawa dalam suatu formulasi yang rentan terkontaminasi setelah proses sterilisasi, sehingga mengurangi umur simpan inokulan mikroba. Salah satu inovasi untuk menghindari hal tersebut yaitu menggunakan mikroenkapsulasi beads alginat. Salah satu keuntungannya adalah mempertahankan sel mikroba selama proses pengolahan dan

penyimpanan pada kondisi yang ekstrim, mudah terdegradasi, dan mudah dimodifikasi sifat fisik atau kimianya (Soumare et al., 2020).

8.4 Faktor yang Memengaruhi Kegagalan Aplikasi Inokulan Mikroba Pelarut Fosfat di Lapangan

Aplikasi inokulan MPF sebelum diterapkan dalam skala luas harus diuji terlebih dahulu dalam skala kecil (skala rumah kaca). Namun seringkali ditemukan hasil efektif pada skala kecil tetapi tidak untuk skala luas. Faktor-faktor yang memengaruhi hal tersebut yaitu kualitas kemampuan mikroba, kemampuan adaptasi dan kompetisi mikroba, dan manajemen aplikasi.

8.4.1 Kualitas Kemampuan Mikroba

Standar kualitas yang harus dimiliki oleh inokulan mikroba dalam pupuk hayati adalah adanya strain yang direkomendasikan dalam bentuk aktif, kemampuan fungsional mikroba dan jumlah yang dibutuhkan. Saat ini, standar kualitas pupuk hayati telah diatur dalam Keputusan Menteri Pertanian Republik Indonesia Nomor: 261/KPTS/SR.310/M/4/2019 tentang Persyaratan Teknis Minimal Pupuk Hayati. Dalam aturan tersebut tidak hanya patokan jumlah mikroba, namun juga diharuskan kemampuan fungsional, patogenisitas pada tanaman, jumlah kontaminan, dan kandungan logam berat. Kemampuan fungsional yang dimaksud selain dapat melarutkan fosfat, mikroba juga memiliki kemampuan menambat nitrogen, melarutkan unsur hara lain seperti kalium, dapat merombak bahan organik, dan dapat membentuk bintil akar.

8.4.2 Kemampuan Adaptasi dan Kompetisi Mikroba

Perubahan lingkungan menciptakan kondisi stress bagi mikroba, sehingga mengharuskan mikroba harus bisa beradaptasi untuk bertahan hidup dan tetap aktif ketika menghadapi stress lingkungan. Ketika inokulan mikroba pupuk hayati di aplikasikan ke tanaman, mikroba harus bisa beradaptasi dengan lingkungan tanaman termasuk jenis tanah, pH, suhu, dan mikrobioma tanah. Tanah termasuk rizosfir merupakan pusat aktivitas biologis karena tersedianya

suplai makanan yang cukup dari eksudat akar. Di dalam tanah terdapat mikrobioma tanah seperti bakteri, fungi, aktinomiset, protozoa, alga, yeast dan nematoda, sehingga terjadinya persaingan untuk mendapatkan ruang, air dan nutrisi. Mikroba yang unggul dalam persaingan yaitu mikroba yang dapat memproduksi metabolit sekunder yang bersifat antimikrobia (antibiosis) yang dapat membunuh patogen atau menghasilkan enzim yang melisiskan sel patogen. Widyati (2013), melaporkan bahwa bakteri *Pseudomonas fluorescens* bersifat antagonistik karena dapat memproduksi 2,4-diace-tylphloroglucinol, pyrrolnitrin, pyoluteorin, phenazines, cyclic lipopeptides, dan hidrogen sianida. Efektivitas senyawa antimikroba tersebut tergantung pada jenis senyawa yang dihasilkan, konsentrasi senyawa, dan mikroba yang menjadi sasarannya.

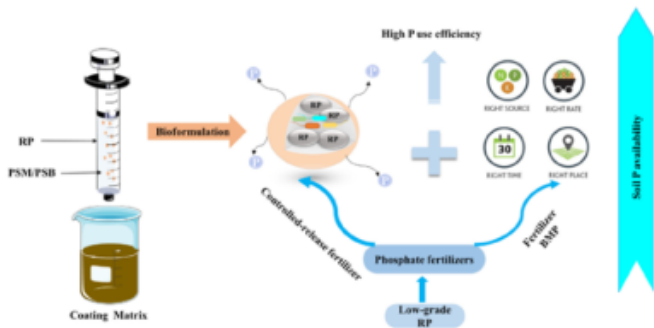
Konsep adaptasi berkaitan dengan kemampuan fisiologi mikroba. Beberapa inokulan mikroba pupuk hayati yang telah dipasarkan banyak menggunakan mikroba konsorsium. Namun penggunaan mikroba konsorsium kurang efisien karena memerlukan berbagai jenis mikroba unggul dan adanya kompetisi nutrisi antar mikroba yang menyebabkan penurunan kemampuan mikroba itu sendiri. Oleh karena itu diperlukan mikroba yang bersifat multifungsional yaitu satu mikroba memiliki dua fungsi atau lebih. Salah satu alternatif untuk mendapatkan mikroba multifungsional yang berkemampuan unggul tersebut yaitu dengan cara mutasi melalui iradiasi sinar gama dan ion beam. Menurut Sukmadewi et al., (2019), sinar gamma termasuk mutagen yang menghasilkan ion dan radikal bebas dalam bentuk hidroksil (OH). Interaksi sinar gamma dengan suatu sel akan menghasilkan radikal bebas, hal ini akan memicu stress oksidatif. Sel mengembangkan mekanisme proteksi dan perbaikan sel yang terinduksi dengan menghasilkan berbagai jenis enzim yang spesifik. Perbaikan sel ini diduga menyebabkan daya adaptasi mikroba termasuk kemampuannya dalam melarutkan fosfat menjadi meningkat.

8.4.3 Manajemen Aplikasi

Praktik agronomi dalam hal nutrisi tanaman dan kesuburan tanah dapat dilakukan melalui manajemen aplikasi pupuk dengan prinsip “4R” yaitu **right source** (sumber yang tepat), **right rate** (takaran yang tepat), **right time** (waktu yang tepat), dan **right place** (tempat yang tepat) (Elhaissofi et al., 2022). Aplikasi dengan sumber inokulan mikroba “right source” dalam pupuk memiliki banyak keuntungan di antaranya: menyuburkan tanah, meningkatkan aktivitas mikroorganisme tanah, meningkatkan daya serap tanah terhadap air, menyediakan hara mineral bagi tanaman, meningkatkan kualitas dan kuantitas

produksi pertanian, meningkatkan daya tahan tanaman, menghasilkan produk sehat dan ramah lingkungan, dan menghemat biaya (Sriwahyuni dan Parmila, 2019).

Pengambilan unsur hara tunggal biasanya digunakan seperti pupuk yang mengandung P yang aplikasinya diperlukan untuk meningkatkan ketersediaan P dalam tanah. Untuk prinsip “right rate”, berkaitan dengan status nutrisi tanah dan kebutuhan tanaman, sehingga diperlukan analisis tanah untuk menentukan kebutuhan aplikasi pupuk P dan untuk memperkirakan takaran P yang dibutuhkan. Aplikasi P harus disinkronkan dengan kebutuhan hara tanaman “right time”, terutama pada tahap pertumbuhan awal perkembangan tanaman, mengingat bahwa tanaman seringkali sensitif terhadap defisiensi P pada tahap pertumbuhan paling awal. Selain itu, suplai P selanjutnya mungkin penting untuk tanaman, yang bergantung pada status P awal. Optimalisasi ketersediaan P untuk tanaman juga dapat dicapai dengan penempatan pupuk P yang tepat “right place”. Penerapan pupuk P di sekitar zona perakaran dapat membantu tanaman menyerap P secara efisien dan secara positif memengaruhi kinerja pertumbuhan dan hasil tanaman secara keseluruhan. Dalam hal ini, aplikasi pupuk P di zona perakaran atau benih lebih baik dari aplikasi di permukaan tanah. Secara keseluruhan, manajemen aplikasi pupuk dengan prinsip “4R” telah terbukti efisien untuk memastikan efisiensi agronomis pupuk P yang lebih baik sambil mempertimbangkan sifat fisik dan kimia tanah dan kebutuhan tanaman (Gambar 8.4) (Elhaissofi et al., 2022).



Gambar 8.4: Ilustrasi Bioformulasi Dengan Praktik Manajemen Aplikasi Pupuk Dengan Prinsip “4R” untuk Mengendalikan Pelepasan P dan Untuk Meningkatkan Efisiensi Agronomi Pupuk (Elhaissofi et al., 2022)

1

Bab 9

Simbiosis Tripartite antara Mikroba Pelarut Fosfat, Pemfiksasi Nitrogen, dan Mikoriza Arbuskula serta Hubungannya terhadap Respon Tanaman

9.1 Pendahuluan

Tanah merupakan komponen penting dalam menyangga komponen yang ada di dalamnya. Unsur-unsur hara yang berada di tanah akan dapat diserap oleh tanaman jika dalam bentuk tersedia. Aspek ketersediaan bagi tanaman menjadi penting ketika tanaman mampu menggunakannya. Terlebih lagi jika lingkungan yang rusak karena diakibatkan aktivitas pertanian seperti penggunaan pupuk atau pestisida kimia. Penggunaan pupuk hayati atau teknologi tertentu dapat mengurangi dalam pemakaian pupuk kimia, misalnya

dengan memanfaatkan mikroba pelarut posfat, pemfiksasi nitrogen atau Fungi Mikoriza Arbuskula.

Mikroba Pelarut Fosfat merupakan mikroorganisme tanah yang dapat memperbaiki penyediaan P pada tanah masam dengan³ menghasilkan asam organik sehingga kelarutan Al dan Fe dapat diturunkan. Mikroba pelarut fosfat terbukti dapat meningkatkan ketersediaan fosfor dan hasil pertanian dengan pendekatan yang ramah lingkungan (Pane, Ginting dan Hidayat, 2022).

Nitrogen dapat diikat secara biologis dengan penambatan yang bersimbiosis pada tanaman legum maupun non legum. Jenis tanaman yang dapat menambat nitrogen misalnya melalui simbiosis dengan rhizobium yaitu pada tanaman kedelai dan kacang tanah; simbiosis dengan Actinomisetes yaitu pada tanaman Alder dan Casuarina equisetifolia; dan simbiosis dengan ganggang biru yaitu pada tanaman kiambang dan lichen (Munawar, 2011).

Keberadaan tanah-tanah yang tidak subur, seperti lahan pasca tambang, tanah salin, dan sebagainya dapat menghambat pertumbuhan dan produksi hasil tanaman karena pH tanah yang masam, miskin unsur hara, penurunan kapasitas penyimpanan air, bentuk dan anatomi daun yang menyimpang, dan bahkan terganggunya proses fisiologis tanaman. Penggunaan Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) mampu meningkatkan pertumbuhan, karena FMA dapat menyerap unsur hara dan air yang berada dari jauh jangkauan akar (Tuheteru et al., 2015).

9.2 Mikroba Pelarut Fosfat

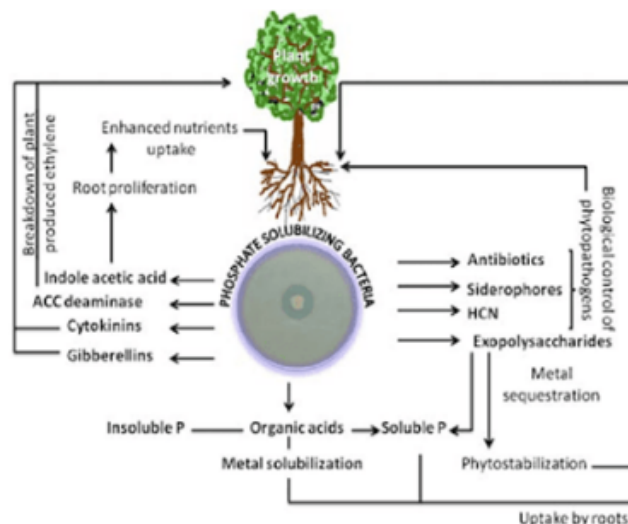
Pemberian pupuk P (phospor) menjadi kurang efisien karena jumlah hara yang diberikan melalui pemupukan tidak dapat diserap secara optimal oleh tanaman. Oleh karena itu, diperlukan usaha untuk meningkatkan efisiensi pemupukan. Salah satunya yaitu diperlukan input biologi berupa pupuk hayati untuk meningkatkan kandungan fosfor dan kesuburan biologi tanah serta ketersediaan hara bagi tanaman.

Selain nitrogen dan kalium, unsur hara makro primer³ yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah besar, yaitu nitrogen. Proses pembentukan makromolekul, seperti protein, asam nukleat, membran plasma, ATP, vitamin dan beberapa senyawa sekunder membutuhkan fosfor. Di antara seluruh populasi mikroba di tanah, 1-50 % merupakan bakteri pelarut fosfat dan 0,1-

3

0,5 % merupakan jamur pelarut fosfat. Mikroba Pelarut Fosfat (MPF) dapat 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. Dengan adanya MPF terbukti membantu meningkatkan pertumbuhan tanaman kelapa sawit dan tanaman lainnya (Pane, Ginting dan Hidayat, 2022).

Mikroba pelarut fosfat bisa berasal dari bakteri yang diketahui dapat melarutkan fosfat berasal dari spesies *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, *Micrococcus*, *Streptomyces*, dan *Flavobacterium*. Spesies-spesies bakteri yang mempunyai daya tinggi untuk melarutkan fosfat adalah *Pseudomonas striata*, *P. rathonis*, *Bacillus polymyxa*, dan *Bacillus megaterium*. Semua bakteri tersebut mempunyai kemampuan yang stabil dalam melarutkan P tidak tersedia dalam tanah



Gambar 9.1: Mikroba Pelarut Fosfat

9.2.1 Hubungan Mikroba Pelarut Fosfat dengan Tanaman

Adanya interaksi antara Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) dan pH tanah terhadap jumlah biji per polong dan tidak terjadi interaksi antara BPF dan pH tanah terhadap jumlah bintil akar. Terdapat pengaruh mandiri dari pH tanah terhadap tinggi tanaman, luas daun, jumlah polong per tanaman, bobot polong kering per tanaman, hasil biji kering per polybag dan bobot 100 butir biji kering (Hartati, Suryaman dan Saepudin, 2023).

Tanaman yang menunjukkan gejala kekahatan P yaitu pada tanah masam. Parameter jumlah biji per polong memiliki interaksi yang baik karena pemberian BPF pada berbagai pH tanah. Parameter tinggi tanaman, luas daun, jumlah polong per tanaman, bobot polong kering per tanaman, hasil biji kering per polybag dan bobot 100 butir biji kering berpengaruh mandiri dari pH tanah (Widawati dan Suliasih, 2006).

Pemberian interaksi BPF dan pupuk fosfor berpengaruh terhadap parameter laju pertumbuhan tanaman, laju asimilasi bersih, tetapi tidak berpengaruh terhadap tinggi tanaman, jumlah anakan dan rasio tajuk akar. Interaksi perlakuan terbaik dari hasil penelitian yaitu pada pemberian BPF dosis 45 ml per polybag dan pupuk fosfor dosis 0,50 g per polybag karena dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman padi sawah Varietas Batang Piaman (Afriani et al., 2021).

9.3 Nitrogen Tanah dan Tanaman

³ Nitrogen (N) merupakan unsur makro yang dibutuhkan oleh tanaman dalam jumlah yang besar. Pertumbuhan vegetatif, batang, dan daun adalah faktor utama dalam metabolisme nitrogen. Jika pasokan nitrogen pada tanaman itu cukup, maka pertumbuhan vegetatif akan berwarna hijau tua. Namun, kelebihan nitrogen akan terjadinya penundaan pada pembungaan dan penentuan buah, dan gejala daun yang menguning, pertumbuhan kerdil, serta gagal panen diakibatkan karena kekurangan pasokan nitrogen (Munawar, 2011).

Nitrogen mendapat perhatian karena jumlahnya sedikit di dalam tanah, namun pada setiap kali panen jumlah yang diambil tanaman cukup banyak; mudah hilangnya N anorganik sangat larut ketika mengalami penguapan atau dalam air drainase; dan pertumbuhan yang jelas dan cepat yang dipengaruhi oleh N, sehingga peningkatan produksi dalam pemakaian N secara efisien (Sagala et al., 2022).

Dalam mendukung pertumbuhan, N memiliki fungsi pada pembentukan asam amino, penyusun sel tumbuhan, membantu kerja enzim dalam pembentukan koenzim; sebagai bahan utama pembentukan kloroplas (bahan utama penyusun klorofil), penyusun komponen utama vitamin bagi tubuh tanaman, komponen penyusun hormon, dan perbanyak anakan, rumpun, dan

peningkatan pertumbuhan batang dan daun pada fase vegetatif (Asril et al., 2023).

8

9.3.1 Sumber Nitrogen Tanah

Total N di dunia masih dalam bentuk mineral dan amonium terfiksasi dalam mineral liat dengan besaran jumlahnya sekitar 98%. N_2 yang memiliki ikatan rangkap tiga yang sangat kuat tidak dapat langsung diserap oleh tanaman yang konsentrasinya sekitar 78% dari 2% total N tanah. Maka dari itu, supaya dapat dimanfaatkan oleh tanaman, maka N_2 harus diubah menjadi bentuk yang tersedia (Munawar, 2011).

8

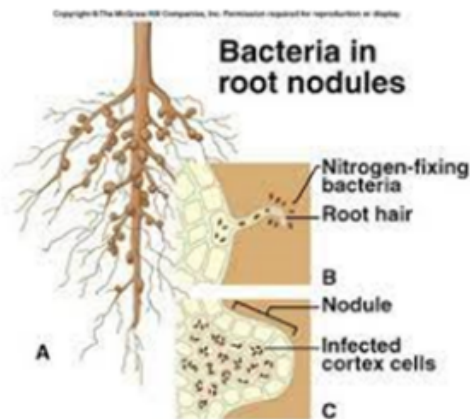
Mekanisme perubahan bentuk N_2 di udara menjadi bentuk yang dapat digunakan tanaman, berupa penambatan N oleh bakteri Rhizobia dan jasad renik lain secara simbiosis pada akar tanaman legum dan bukan legum; penambatan N oleh jasad renik hidup bebas dan yang hidup pada berbagai daun tanaman; penambatan N lewat petir; serta penambatan sebagai amoniak, NO_3 , atau CN_2 , melalui proses industri pupuk N (Tisdale, Nelson dan Beaton, 1990).

9.3.2 Penambatan Nitrogen oleh Bakteri Simbiosis

Pertanian berkelanjutan (Sustainable agriculture) dan lingkungan turut berperan penting dalam penambatan (fiksasi) nitrogen. Umumnya, tanaman mengasimilasi nitrogen hanya dari tanah melalui penambahan pupuk. Selain dari pupuk anorganik, sumber unsur hara nitrogen juga dapat diperoleh dari bahan-bahan yang ada di lingkungan sekitar, yaitu tanaman atau tumbuhan. Keberadaan pupuk organik seringkali diabaikan karena aplikasinya tidak sepraktis pupuk kimia atau pupuk anorganik. Selain itu, kandungan nitrogen pada bahan organik (tumbuhan atau tanaman) relatif lebih rendah dibandingkan pupuk kimia.

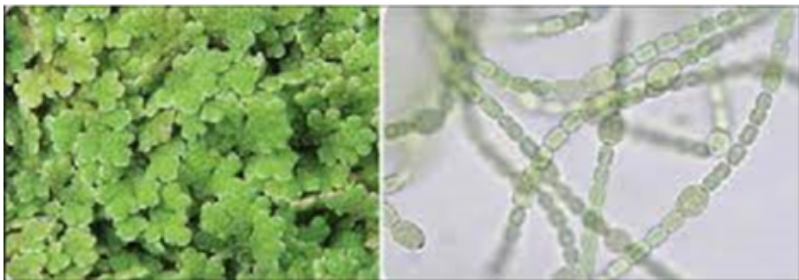
Sumber alternatif lain adalah Rhizobia yang mampu menyebabkan pembentukan nodul pada akar dari tanaman legum sebagai tanaman inang. Organ tanaman khusus diserang oleh bakteri yang memfiksasi nitrogen dalam keadaan bakteroid endosimbiotik dalam sel tanaman. Proses ini melibatkan pengenalan spesifik dan diferensiasi berkembang baik bakteri dan sel tanaman inang. Rhizobia berhadapan dengan bermacam-macam kondisi lingkungan seperti bakteri yang hidup bebas dalam tanah, selama proses infeksi dan seperti diferensiasi bakteroid dalam sel tanaman.

8
Tanaman legum mempunyai hubungan simbiosis dengan bakteri dari genus *Rhizobium*, kelompok bakteri aerobik berbentuk batang rizosfer. Keberadaan bakteri di dekat rambut akar menyebabkan rambut akar bercabang dan melekok kemudian diikuti oleh invasi bakteri. Lalu bakteri memasuki ujung rambut akar dan menembus sel sel korteks bagian dalam. Di dalam sel bakteri mengalami pembelahan sel dan memperbanyak diri. Hal ini direspon tanaman dengan mmembentuk bintil yang membengkak seperti tumor yang mengandung sel sel bakteri yang mengalami perubahan bentuk dan metabolismenya, yang disebut dengan bakteroid (Foth dan Ellis, 1997).



Gambar 9.2: Bintil Akar Pada Tanaman Legum

8
Tanaman non-legum yang berasosiasi dengan jenis jamur actinomycetes yang turut menyumbang penambatan N udara secara signifikan, seperti *Alnus*, *Ceanothus*, *Eleagnus*, *Casuarina* dan lain-lain. Beberapa jenis tanaman lain mendapatkan manfaat dari penambatan N yang hidup berasosiasi dengan tanaman tersebut, seperti tanaman kiambang (*Azolla*) yang berasosiasi dengan ganggang hijau biru (cyanobacteria), seperti *Anabaena azolla*, yang terdapat pada Gambar 9.3 (Nurhayati, 2021).



Gambar 9.3: *Anabaena Azolla*

Pemberian bakteri simbiotik penambat nitrogen dapat mengurangi biaya penggunaan pupuk kimia karena memiliki harga yang mahal dan dapat dapat mencemari lingkungan. Keuntungan memanfaatkan bakteri penambat nitrogen sebagai pupuk hayati adalah tidak mempunyai bahaya atau efek samping, efisiensi penggunaan dapat ditingkatkan tanpa menimbulkan bahaya pencemaran terhadap lingkungan, harga yang relatif murah, dan teknologi yang cukup sederhana (Sari dan Prayudyaningsih, 2015).

8

9.3.3 Penambatan Nitrogen oleh Bakteri Hidup Bebas

Bakteri yang sering kita kenal seperti *Azotobacter* dan *Beijerinckia* merupakan bakteri hidup bebas yang bersifat aerobik dan anaerobik yaitu bakteri jenis *Clostridium*. Walaupun keberadaan *Azotobacter* tidak melimpah, namun dapat dijumpai pada semua jenis tanah, dapat tumbuh dengan baik pada pH tanah berkisar 6-7. Dibandingkan dengan *Azotobacter*, *Clostridium* lebih toleran terhadap tanah masam. Aktivator pada bakteri hidup bebas adalah Mo dengan adanya akumulasi nitrit dan amoniak di dalam tanah yang menyebabkan aktivitasnya terhambat (Munawar, 2011).



Gambar 9.4: *Azotobacter* (kiri) dan *Clostridium* (Kanan)

9.3.4 Hubungan Pemfiksasi Nitrogen dengan Tanaman

Penurunan penggunaan pupuk NPK dan pengendalian serangan penyakit rebah semai merupakan aktivitas ganda *Azotobacter*. Kejadian penyakit rebah semai kacang panjang yang signifikan sampai 10 hari setelah tanam dapat diturunkan dengan inokulasi *Azotobacter* melalui metode aplikasi apapun. Penurunan kebutuhan pupuk NPK anorganik sebanyak 25-50% tanpa mengurangi hasil karena efek ganda *Azotobacter* sebagai *biofertilizer*, *biostimulan* dan *bioprotektan* (Hindersah et al., 2018).

Terjadi peningkatan sebanyak 0,006% per hari pada dua dari tiga perlakuan Tanaman kedelai yang berasosiasi dengan bakteri *Synechococcus sp*, dan adanya penambahan urea 200 kg/ha cenderung meningkatkan kandungan klorofil daun, panjang daun, dan rendemen panen tembakau Besuki Na-Oogst (BesNo) (Hindersah et al., 2018).

Pada perlakuan pemberian unsur hara nitrogen dan molibdenum yang bertujuan untuk mengefektifkan peran bintil akar tanaman buncis blue lake tidak memberikan hasil yang nyata pada pemberian molibdenum. Diduga akibat tidak adanya bintil akar yang tumbuh pada akar tanaman buncis blue lake, sedangkan peran molibdenum adalah sebagai unsur hara yang membantu mengaktifkan enzim nitrogenase. pada tanaman buncis blue lake tidak terjadi pembentukan bintil akar, sehingga molibdenum tidak dapat berperan sebagai katalis dalam membantu penambatan N₂ di udara (Hindersah et al., 2018).

9.4 Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA)

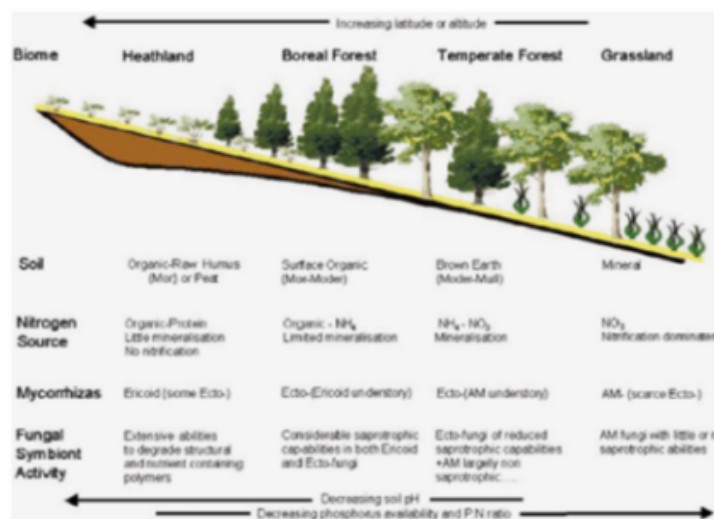
Fungi Mikoriza Arbuskula (FMA) atau yang sering disebut mikoriza merupakan cendawan tanah yang bersimbiosis dengan akar tanaman inang, dan mempunyai pengaruh yang luas terhadap mikroorganisme yang bersifat patogen. Akar tanaman inang yang terinfeksi dengan mikoriza, eksudat akarnya berbeda dengan eksudat akar yang tidak terinfeksi dengan mikoriza.

Ada 4 macam peran fungsional FMA yaitu (Nusantara, Bertham dan Mansur, 2012).

1. Sebagai bioprosesor, karena mampu bertindak sebagai pompa dan pipa hidup yang membantu tanaman untuk menyerap hara dan air dari lokasi yang tidak terjangkau oleh akar rambut.
2. Sebagai bioprotektor atau perisai hidup, karena mampu melindungi tanaman dari berbagai cekaman biotik dan abiotik.
3. Sebagai bioaktivator, karena terbukti mampu membantu meningkatkan simpanan karbon di rhizosfer sehingga meningkatkan aktivitas jasad renik untuk menjalankan proses biogeokimia.
4. Sebagai bioagregator karena terbukti mampu meningkatkan agregasi tanah.

Fungi **Mikoriza Arbuskula** dibedakan menjadi endomikoriza dan ektomikoriza. Perbedaan yang paling mudah untuk diingat adalah kemampuan dalam menginfeksi akar. Membran sel dapat ditembus oleh hifa endomikoriza, sedangkan infeksi ektomikoriza di sekitar antar sel korteks. Perbedaan lainnya adalah ektomikoriza bersifat fakultatif, membentuk tubuh buah, mantel dan hartig-net dengan kisaran inang yang sempit (berasosiasi pada famili Dipterocarpaceae, Pinaceae, Fagaceae, Eucalyptus spp., Gnetum gnemon, dan sebagainya). Namun, pada endomikoriza, spora tidak dapat dilihat tanpa bantuan mikroskop, ada struktur vesikula dan arbuskula, dan bersifat obligat (Smith dan Read, 2008).

Struktur yang dimiliki FMA biasanya terdapat arbuskula dan vesikula di dalam akar yang terinfeksi. Arbuskula berfungsi sebagai tempat pertukaran unsur hara dan karbon antara tanaman dan fungi. Arbuskula merupakan unit kolonisasi yang telah mencapai sel korteks yang dapat menembus dinding sel dengan membentuk percabangan yang kompleks (terlihat seperti pohon kecil yang memiliki cabang-cabang). Vesikula memiliki fungsi sebagai organ penyimpanan. Vesikula merupakan pembentukan hifa-hifa utama dengan struktur yang menggelembung. Selain arbuskula dan vesikula, FMA juga memiliki hifa internal, hifa eksternal dan spora (Smith dan Read, 2008).



Gambar 9.5: Hubungan Antara Distribusi Bioma Sepanjang Gradien Utara Bumi Dan Peran Asosiasi Mikoriza Dalam Pengambilan N dan P.

Read dan Perez-Moreno (2003), mendeskripsikan hubungan altitude dan latitude mulai dari padang rumput hingga daerah pedalaman dengan aktivitas

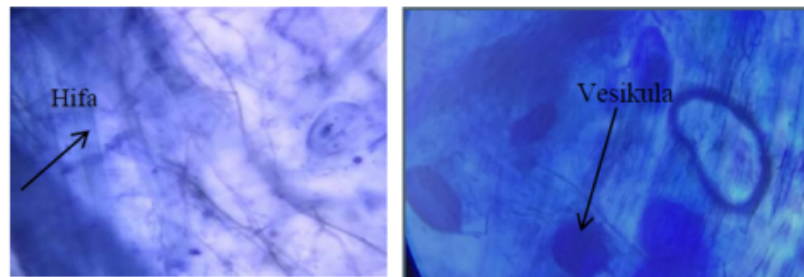
simbion fungi yang melibatkan perubahan-perubahan reaksi kimia dan ketersediaan N-P tanah (Gambar 9.5). Makin meningkat ketinggian tempat dan lintang di blahan utara bumi, maka pH tanah makin menurun dan ketersediaan serta rasio P/N makin menurun. Sumber nitrogen pada padang rumput didominasi oleh nitrifikasi NO_3^- ; sedang pada hutan beriklim (temperate forest), hutan boreal (boreal forest), dan daerah pedalaman (heatland) masing-masing mineralisasi $\text{NH}_4^+\text{NO}_3^-$, mineralisasi terbatas NH_4^+ -organik, dan tanpa nitrifikasi dengan sedikit mineralisasi sedikit protein-organik (Sutarman, 2016).

9.4.1 Isolasi dan Identifikasi Fungi Mikoriza Arbuskula

Penyiapan bahan yang digunakan merupakan tahap awal dalam mengetahui keberadaan dan perilaku propagul FMA (spora, hifa ekstraradikal, akar bermikoriza) yang masih hidup. Pengambilan contoh tanah dan akar ini, serupa dengan prinsip dalam pengambilan contoh tanah untuk analisis fisika, kimia, dan biologi tanah, serta contoh jaringan tanaman. Pengambilan contoh tanah dapat dilakukan secara proporsional maupun non proporsional. Secara proporsional adalah dengan berdasarkan pada pola geometris tertentu, sedangkan secara non proporsional adalah dengan berdasarkan sesuai dengan kondisi lapangan yang ada (Nusantara, Bertham dan Mansur, 2012).

Pewarnaan FMA digunakan dalam menentukan derajat dan intensitas kolonisasi akar tanaman oleh FMA dengan tujuan utama apakah akar tanaman dikolonisasi akar FMA atau tidak. Akar yang semakin tua, maka kadar ligninnya akan semakin tinggi, maka akan memiliki pigmen yang beragam dan maka akan semakin sulit juga dibersihkan dengan KOH. Penambahan beberapa tetes H_2O_2 atau pun penggunaan otoklaf dengan suhu 12°C selama 15-20 menit sangat dianjurkan. Jika akar yang digunakan tidak melebihi 1-2 g, maka pembersihan akar dengan KOH akan efektif (Brundrett et al., 1996).

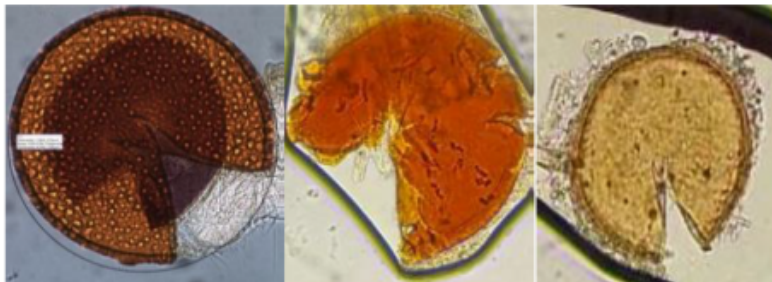
Hasil penelitian (Paulina, Mansur dan Junaedi, 2018) menyebutkan bahwa setelah berumur 19 bulan, bibit aren yang awalnya tidak bermikoriza menjadi terinfeksi FMA dan dapat beradaptasi serta mampu hidup pada lahan bekas tambang batubara. Akar tanaman aren yang terinfeksi FMA terlihat dari adanya hifa dan vesikula.



Gambar 9.6: Akar Aren Yang Terinfeksi FMA di Lahan Pasca Tambang yaitu adanya Hifa (kiri) dan vesikula (kanan) dengan Pembesaran 40 x menggunakan Mikroskop.

9.4.2 Identifikasi dan Morfologi Spora

Cara pengamatan morfologi spora (warna, bentuk, ukuran, hifa dan ornamen spora) maupun pembuatan preparat slide. Hasil penelitian (Paulina, Mansur dan Junaedi, 2020) ditemukan beberapa tipe spora FMA pada bibit Aren berumur 19 bulan, yaitu *Acaulospora* sp., *Gigaspora* sp., dan *Glomus* sp.



Gambar 9.7: Tipe spora FMA yaitu *Acaulospora* sp. (kiri), *Gigaspora* sp. (tengah), dan *Glomus* sp (kanan).

9.4.3 Hubungan Fungi Mikoriza Arbuskula dengan Pertumbuhan Tanaman

Beberapa hasil penelitian terkait dengan FMA dengan tanaman, seperti hasil penelitian (Lumbantoruan et al., 2022) pada perlakuan PH3 yaitu mikoriza+azolla merupakan hasil terbaik secara mandiri maupun interaksi dapat meningkatkan tinggi tanaman, jumlah daun, panjang akar dan berat biji per malai. Perlakuan pupuk hayati mikoriza dan petrobio serta intensitas penyiraman belum mampu mengoptimalkan pertumbuhan jagung seperti

tinggi tanaman, diameter batang, jumlah daun, bobot kering akar, bobot kering akar, dan bobot kering tanaman ditanah gambut. Namun, mampu meningkatkan rata-rata jumlah tongkol jagung, panjang akar dan berat tanah (Febriyansah, Lumbantoruan dan Paulina, 2023).

Setiap minggu, pertumbuhan tanaman jagung manis terus meningkat walaupun tidak berpengaruh nyata terhadap pemberian biochar dan mikoriza. Pemberian perlakuan biochar dan mikoriza memiliki pengaruh yang tidak nyata pada peubah pertumbuhan yaitu tinggi tanaman pada 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 MST. Analisis varian memiliki pengaruh nyata pada peubah panjang tongkol, diameter tongkol, dan bobot 100 biji pada perlakuan biochar dan mikoriza, sedangkan peubah bobot tongkol tanaman-1 tidak memiliki pengaruh nyata terhadap pemberian biochar dan mikoriza (Paulina dan Lumbantoruan, 2022).

Mikoriza dan bakteri *P. fluorescens* mempunyai peranan yang penting dalam meningkatkan serapan P pada tanah Andisol yaitu sebesar 0.31 g tanaman-1 atau setara 24%. Inokulasi mikoriza dan bakteri *P. fluorescens* dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman jagung sebesar 27.59%. Kombinasi antara mikoriza dan bakteri *P. Fluorescens* dengan perlakuan 30 spora mikoriza dan 109 cfu mL-1 bakteri *P. fluorescens* mempunyai hasil yang paling optimal terhadap serapan P dan pertumbuhan tanaman jagung (Musafa, Aini dan Prasetya, 2015).

Bab 10

Rekayasa Genetika Mikroba Pelarut Fosfat dan Prospek Masa Depan

10.1 Pendahuluan

Pada hakekatnya setiap aspek biologi dan kedokteran dipengaruhi secara nyata oleh pengetahuan baru ini. Mikrobiologi, biokimia, biologi molekuler dan genetika sebagai ilmu-ilmu dasar yang mendukung perkembangan dan kemajuan bioteknologi. Rekayasa genetika merupakan salah satu penerapan metode mutakhir bioteknologi dalam upaya meningkatkan kemampuan bioteknologi untuk menghasilkan produk-produk penemuan baru.

Karakteristik bioteknologi moderen salah satunya melibatkan rekayasa biologi (teknobiologi). Pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi melahirkan berbagai pengembangan teknik-teknik rekayasa genetika terutama pemahaman struktur-struktur DNA sebagai gambaran dari ciri khas karakteristik sifat yang dimiliki oleh suatu makhluk hidup. Metode ini sangat penting dan memberi kontribusi pada pengembangan bioteknologi moderen meliputi manipulasi gen, kloning gen, DNA rekombinan, teknologi modifikasi genetika dan genetika moderen (Sutarno, 2014).

Teknik perlakuan pembaharuan karakter organisme sesuai dengan keperuntukan melalui pemanfaatan gen dari spesies lain salah satunya termasuk pemuliaan hewan dan tanaman melalui seleksi dalam populasinya. Teknik tersebut oleh para peneliti dikenal dengan istilah rekayasa genetika merupakan suatu metode untuk memodifikasi DNA/gen atau mengubah gen yang kemudian mentransfer gen tersebut ke organisme lain yang berbeda spesies atau yang sama. Pemilihan karakteristik organisme yang dipilih untuk keperluan ini, adalah organisme yang memiliki karakteristik tertentu seperti penanganannya mudah serta dalam kurun waktu singkat memiliki karakteristik cepat tumbuh dalam waktu singkat. Keunggulan teknik rekayasa genetik yakni dalam waktu singkat dan memiliki ketepatan tinggi dalam mentransfer sifat genetik dari berbagai jenis-jenis inti DNA. (Hidayati, et al.2009).

Salah satu kemajuan dalam proses rekayasa genetika yakni pada mikroba khususnya mikroba pelarut fosfat. Dalam genetika mikroba, hal penting yang perlu dikaji adalah bagaimana kemampuan suatu mikroorganisme untuk mempertahankan vitalitas daya hidupnya, kemampuan untuk beradaptasi serta kemampuan dalam implementasi. Demikian halnya dengan mikroba pelarut fosfat tujuannya untuk meningkatkan kesuburan tanah dan mempercepat proses pengomposan. (Andayanto, et al, 2007).

Mikroba pelarut fosfat adalah mikroorganisme berkemampuan untuk melarutkan fosfat yang sebelumnya belum ada yang pada akhirnya ada dan diserap tumbuhan. Olehnya itu diharapkan bahwa dengan memanfaatkan mikroorganisme pelarut fosfat membantu para petani sebagai solusi dalam mengatasi permasalahan kurangnya kandungan fosfat khususnya pada kondisi tanah yang pH asam. Keberagaman mikroorganisme pelarut fosfat di berbagai tempat disebabkan oleh karakteristik biologisnya. Beberapa mikroorganisme pelarut fosfat berkemampuan hidup pada kondisi asam, atau kondisi netral dan basa. Selain itu, memiliki sifat kecenderungan yang kuat untuk mengikat atau menyerap air (hipofilik), tidak suka air (hidrofob) baik dalam kondisi aerob dan anaerob. Setiap mikroba dengan karakteristik biologisnya tersendiri tergantung situasi keberagaman tanah yang ditempati berdasarkan perbedaan derajat keasaman tanah baik tanahnya bersifat asam atau basa, tentunya sangat memengaruhi efektivitas mikroba dalam melarutkan fosfat dalam tanah. (Hidayati, et al.2009). Perkembangan riset saat ini terkait pembaharuan-pembaharuan metode isolasi dan sintesis struktur-struktur gen rantai molekuler memberi peluang besar tidak hanya bidang pertanian tetapi juga kemajuan khususnya dibidang perekonomian negara (Andayanto, et al, 2007).

Dewasa ini permasalahan dibidang pertanian khususnya kesuburan tanah persawahan yang semakin jenuh karena pemupukan, olehnya itu diharapkan pemanfaatan mikroorganisme pelarut fosfat dapat membantu para petani sebagai solusi dalam mengatasi permasalahan kurangnya kandungan fosfat pada saat pemupukan di lokasi persawahan.

10.2 Tinjauan Umum Rekayasa Genetik

10.2.1 Prinsip Dasar dan Tujuan Rekayasa Genetik

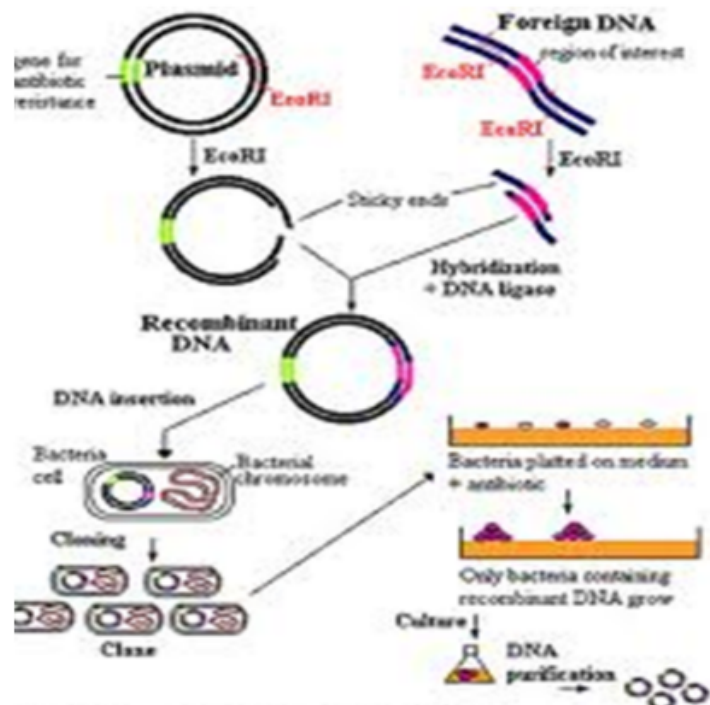
Pewarisan sifat atau hereditas merupakan prinsip ilmu genetika. Genetika adalah suatu kajian ilmu pengetahuan yang mengkaji tentang gen, struktur molekul, karakteristik sifat serta mempelajari mekanisme pertumbuhan dalam membentuk karakter baru transgenik. Contoh Bakteri *Escherichia Coli* merupakan bakteri yang selalu dimanfaatkan untuk proses rekayasa genetika dengan alasan bahwa bakteri ini pada stuktur-struktur molekulernya mudah dipelajari.

Perkembangan metode/teknik proses transgenik adalah proses pemasukan DNA dari mikroorganisme lain ke mikroorganisme lainnya melalui proses identifikasi dan isolasi. Perkembangan ilmu rekayasa genetika ini diawali dengan kajian tentang kromosom. Pemahaman tentang struktur-struktur DNA membantu pengembangan ilmu rekayasa genetik ini sehingga teknik manipulasi gen (kromosom) di mana karakteristik asli suatu gen genetik makhluk hidup yang tidak sama dilakukan melalui transgenik susunan DNA.

Kemajuan dalam merekayasa beberapa obyek genetik ini, disepakati oleh para ilmuwan digunakan untuk hal-hal yang bermanfaat antara lain mencakup sebagian besar klasifikasi organisme yakni bakteri, fungi, hewan tingkat rendah, hewan tingkat tinggi serta tumbuh-tumbuhan. Modifikasi rekayasa genetika tertinggi kebanyakan dilakukan pada bidang kedokteran dan farmasi untuk penemuan yang relatif baru.

Melalui metode modifikasi genetik maka perubahan karakteristik obyek yang akan ditransgenik dan didukung oleh penerapan bioteknologi yang memiliki akurasi dan presisi tinggi dapat dilaksanakan. Seiring dengan riset-riset yang telah dilaporkan, maka beberapa bidang ilmu turut berperan penting mendukung vitalitas pengembangan ilmu rekayasa genetika. Tujuan teknologi

transgenik ini adalah merubah karakter asli (alami) suatu individu menjadi karakter baru sebagai hasil modifikasi manusia sesuai peruntukannya. Individu yang telah dirubah gen aslinya diistilahkan “transgenik”.



Gambar 10.1: Rekayasa Proses Transgenik

Pada prinsipnya untuk melakukan rekayasa genetik, maka metode yang digunakan untuk memodifikasi atau memanipulasi unsur-unsur genetik yakni DNA atau gen dari satu gen atau lebih yang beragam disitribusikan atau dimasukkan pada sel yang lain melalui prose dan metode isolasi dan sintesis komponen-komponen gen yang diinginkan. Organisme yang berhasil ditransgenetiknya diupayakan memiliki karakter unggul yang diharapkan daripada karakter aslinya yang di sebut (GMO). (Valverde, 2006).

10.2.2 Istilah-istilah dalam Rekayasa Genetik

Beberapa istilah dalam teknik rekayasa genetika: transgenik, modifikasi genetika (geneticallymodified), rekombinasi DNA, kloning gen adalah ilmu-ilmu kajian tentang perlakuan/modifikasi transgenik keperluan mengisolasi, memperbaharui kembali dan memperbaharui sifat genetik mahluk lain dari mahluk asalnya. Beberapa riset telah dilakukan terkait tahapan-tahapan dalam

melakukan teknik rekayasa genetik berdasarkan pada tiga prinsip utama teknik rekayasa genetika yaitu: (1) Rekombinasi DNA (2) Fusi Sel (3) Kultur Jaringan. Upaya untuk memproduksi organisme lain yang memiliki sifat-sifat dan karakteristik baru dan unggul yang telah direncanakan, harus mengkaji teknik bagaimana melakukan rekayasa genetika dijelaskan sebagai berikut:

1. Prinsip Dasar 1: Rekombinasi DNA

Rekombinasi DNA merupakan teknik rekayasa genetika penting dalam pengembangan riset. Dalam teknik rekomendasi gen, langsung memanipulasi DNA berorientasi pada karakter mahluk lain dengan cara mengisolasi dan mendistribusikan potongan DNA menjadi karakteristik sifat yang diinginkan (Artanti et al., 2010). Untuk memproduksi gen baru, maka transfer genetik dari mikroorganisme lain bisa dimodifikasi dengan proses rekombinasi DNA. Pada intinya, teknik ini menggabungkan DNA/DNA yang berasal dari beberapa sumber yang berbeda dengan tujuan menghasilkan produk gen baru. Teknik ini disebut rekombinasi gen. Adapaun pertimbangan atas teknik penggabungan DNA/DNA bahwa (1) semua spesies mahluk hidup memiliki struktur DNA sama (2) DNA/DNA dapat disambung-sambungkan.

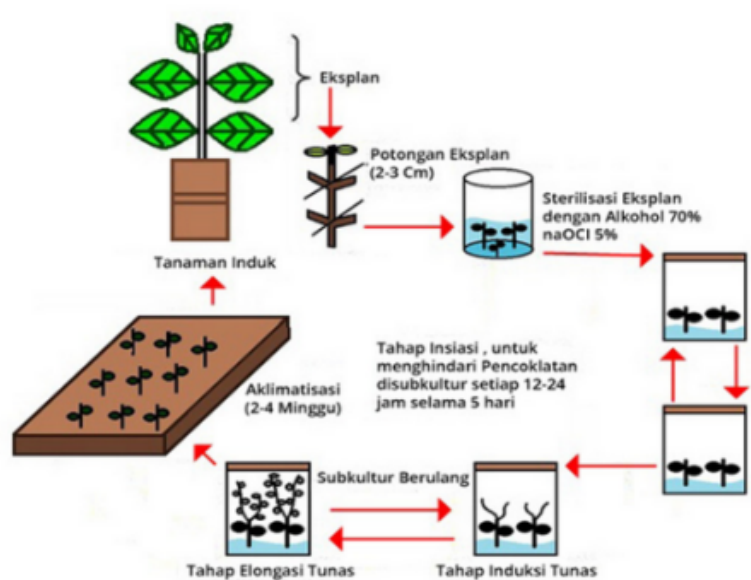
Tahapan dasar dalam pengembangan teknik rekayasa genetik (a) Perlakuan untuk plasmid yang direncanakan akan direkayasa (b) Memasukkan plasmid yang sudah di perbaharui atau direkayasa ke dalam tubuh bakteri (c) Tahap mengekstraksi plasmid/cincin DNA dari sel bakteri (d) Melakukan identifikasi gen yang sudah direncanakan sebelumnya atau gen yang diinginkan (e) Tahap pengembangbiakan bakteri dalam wadah tabung fermentasi yang sudah disterilkan sebelumnya (f) Produk Organisme yang berhasil ditransgenetiknya yang memiliki karakter unggul dari aslinya

2. Prinsip Dasar 2: Fusi Sel

Pengertian fusi sel dalam bioteknologi adalah suatu teknik rekayasa genetik yang juga dikenal dengan teknik hibridoma untuk menghasilkan sel tunggal yang memiliki gen-gen dari dua sel berbeda melalui proses peleburan atau penyatuan 2 sel yang sama atau berbeda. Dalam teknik ini diperlukan (a) sel sumber gen (sumber sifat ideal) (b) sel wadah (sel yang mampu membelah cepat dan (c) fusi gen (zat-zat yang mempercepat fusi sel)

3. Prinsip Dasar 3: Kultur Jaringan

Kultur jaringan adalah teknik budidaya jaringan tanaman untuk mengembangkannya menjadi tanaman baru dengan karakteristik perilaku dan karakter yang mirip atau sama dengan induknya. Teknik budidaya ini dilakukan dengan cara melakukan identifikasi dan isolasi salah satu bagian tanaman yakni kumpulan sel atau jaringan yang ditumbuhkembangkan dengan cara pembiakan vegetatif dalam keadaan aseptik untuk menghindari tanaman dari gangguan penyakit. Proses ini akan menghasilkan tanaman-tanaman baru dengan jumlah yang banyak dan memiliki sifat yang sama.



Gambar 10.2: Perbanyakkan Tanaman Dengan Metode Kultur Jaringan

Kultur jaringan termasuk bagian rekayasa genetika karena menggunakan metode isolasi sel atau jaringan serta membudidayakannya dalam lingkungan yang terkendali dan aseptik. Kultur jaringan adalah membudidayakan suatu tumbuhan melalui kultur jaringan tumbuhan yang memiliki sifat totipotensi.

10.3 Rekayasa Genetik Mikroba Pelarut Fosfat

10.3.1 Unsur Fosfat (P) dalam Lingkungan Hidup

Fosfat merupakan sekelompok senyawa yang mengandung unsur fosfor yang berikatan dengan unsur oksigen (O) salah satu contohnya adalah (H_2PO_4) asam fosfat. Pupuk sebagai penyubur tanaman memiliki kandungan fosfat. Fosfor (P) adalah unsur penting yang digunakan dalam proses fotosintesis, perkembangan akar, pembentukan bunga, buah dan biji. (Marta Ritonga, et al, 2015).

Kandungan senyawa fosfat organik banyak terdapat pada tumbuhan dan hewan sementara senyawa fosfat anorganik banyak terdapat pada air dan tanah yang kemudian melalui proses pengikisan dalam kurun waktu akan mengendap disedimen. Bentuk senyawaan fosfat yang di absorpsi tanaman adalah dalam bentuk H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} . Kondisi lingkungan tanah yakni pH tanah sangat memengaruhi mekanisme absorpsi tanaman terhadap ion H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} . Tanah yang memiliki pH rendah maka tanaman mengabsorpsi dalam bentuk ion H_2PO_4^- selanjutnya meningkat ke pirofosfat dan metafosfat. Salah satu jenis tanah yang berpotensi kandungan P yang tinggi adalah Andisol yakni ($\geq 85\%$) menyebabkan kesediaan P pada tanaman tidak tersedia.

Unsur fosfor berupa partikel-partikel fosfor padat dalam atmosfer dan keberadaanya berupa senyawa-senyawa fosfat yang larut dalam air tanah melalui proses pengikisan batuan fosfat dengan adanya pengaruh iklim.

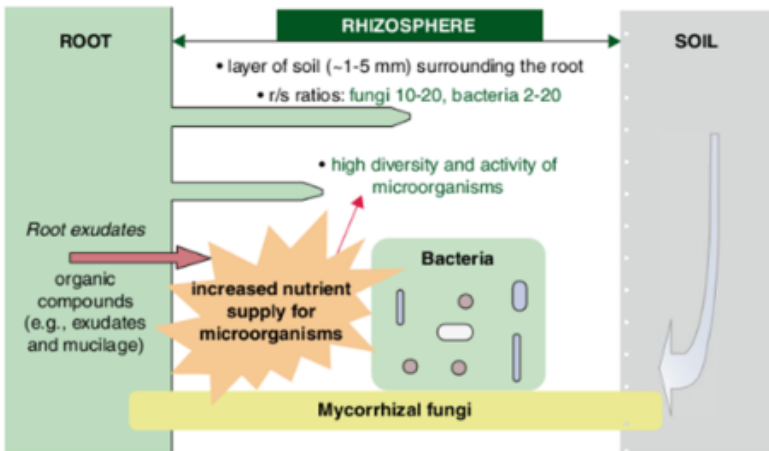
Dalam proses fotosintesis dan pertumbuhan akar tanaman, unsur fosfat sebagai unsur penting. Olehnya itu, jika tanaman mengandung sedikit atau kurang asupan fosfat akan menimbulkan pertumbuhan akar tanaman menjadi lambat dan kerdil. Akan tetapi kelebihan fosfat pada tanaman juga bisa menyebabkan gangguan pertumbuhan tanaman yakni penyerapan unsur mikro terhalangi. Pengikatan P-(Fe), P-(Cu), P-Zn menjadikan tanaman kekurangan unsur ini.

Sejumlah lahan khususnya lahan persawahan di negara kita banyak mengandung fosfat. Namun demikian, tanaman tidak dapat memanfaatkan fosfat secara maksimal, karena kedudukan fosfor dalam bentuk senyawaannya terikat dalam tanah yakni berupa karang-karang fosfor. Olehnya itu, para petani secara terus-menerus melakukan pemupukan tanah terutama dilahan-

lahan persawahan, meskipun kondisi kandungan fosfor sudah berlebihan. Namun demikian dari penggunaan pupuk tersebut, melalui proses kimiawi yang dapat diserap tanaman hanya sekitar jumlahnya 15-20% pupuk fosfat yang terserap. Justru sebagian besar persentasi kadar fosfat tertinggal sebagai residu di antara koloid tanah. Proses kimiawi ini menjadikan permasalahan defisiensi pemupukan. (<http://balittanah.litbang.pertanian.go.id/570-fosfat124>).

10.3.2 Jenis–Jenis Mikroorganisme Pelarut Fosfat

Peran fosfat di semua tanaman, mempercepat pertumbuhan suatu tanaman hingga cepat mengalami pembuahan dan pemasakan buah dan biji. (Sutedjo, 2002). Teknik rekayasa menggunakan mikroba dalam mengatasi rendahnya fosfat yang diserap tanam⁵, membutuhkan peran kikroorganisme yang dapat melarutkan fosfat yang dapat diserap oleh tanaman. Pemanfaatan mikro-organisme pelarut fosfat diharapkan dapat mengatasi masalah tersebut. Berikut contoh salah satu mikroba yakni Rhizosphere dalam pengaturan interaksi tanaman dan tanah, ditunjukkan pada Gambar 3.



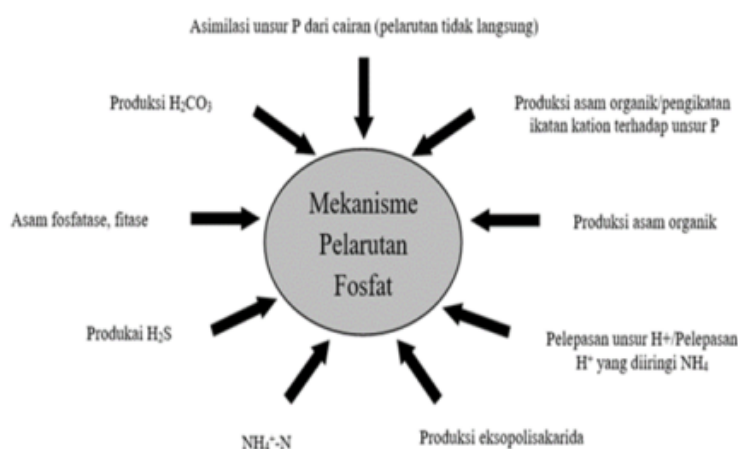
Gambar 10.3: Peran Mikroba Tanah Dalam Pengaturan Interaksi Tanaman dan Tanah (Richardson, et al., 2009) dalam (Prihastuti, 2016)

Kegunaan fosfor adalah sebagai pupuk pertanian. Ketersediaan fosfat yang mencukupi dalam proses produksi tanaman sangat penting. Oleh karena senyawaan ini dalam bentuk ionnya merupakan anion utama yang menyediakan unsur fosfor (P) bagi tanaman. Anion fosfat ini merupakan bagian utama struktur molekuler (DNA/RNA) serta berperan dalam proses fotosintesis yakni mengalirkan kalor sinar matahari pada senyawa ATP/ADP.

10.3.3 Mekanisme Kerja Mikroba Pelarut Fosfat

Reaksi dari asam-asam organik hasil dari kinetika kerja mikroba dalam pelarutan fosfat akan membentuk senyawa kompleks AlPO_4 , FePO_4 , dan $\text{Ca}(\text{PO}_4)_2$, dengan mineral Aluminium, Besi dan kalsium sehingga P terikat tanah akan bebas yang menjadi stok fosfat untuk tanaman. Interaksi antara tanaman dan mikroba dapat berupa antagonisme, komensalisme, mutualisme ataupun parasitisme. Komensalisme atau mutualisme merupakan interaksi umum dan saling membutuhkan.

Berikut mekanisme kerja mikroba pelarut fosfat ditunjukkan Gambar 10.4.



Gambar 10.4: Mekanisme Kerja Mikroba Pelarut Fosfat

(https://www.researchgate.net/figure/Gambar-53-Mekanisme-pelarutan-fosfat-oleh-bakteri-pelarut-fosfat-Zaidi-et-al-2009_fig2_357680441)

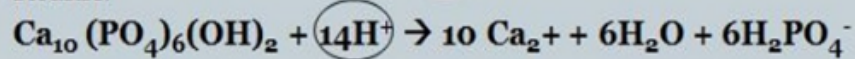
Jenis bakteri seperti *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Aerobacter aerogenes*, dan *Xanthomonas* merupakan jenis mikroba tanah yang ikut berperan dalam rantai siklus hara fosfor. Mikroorganisme tersebut dapat melarutkan fosfat sehingga dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Menurut (Gunarto dan Hayati, 1994) kebanyakan dilahan pertanian di Indonesia terdapat kelompok bakteri berasal dari genus *Enterobacter* dan *Mycobacterium*. Mikroba-mikroba ini berpotensi dan berpeluang besar untuk dimanfaatkan dalam mengatasi permasalahan pemupukan di bidang pertanian.

Produksi asam-asam organik jenis mikroba tanah seperti asetat, laktat, malat, oksalat, susinat, sitrat, glukonat, ketoglukonat dan lain sebagainya mampu membentuk kompleks khelat melalui mekanisme absorpsi dengan logam-

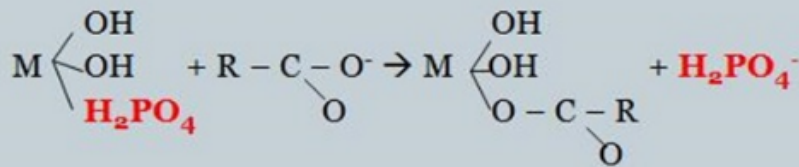
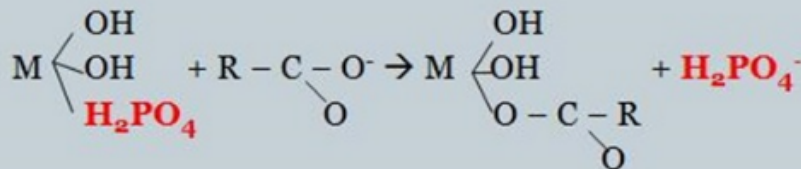
logam mineral tanah yakni Fe atau Al sehingga melepaskan P yang tersedia bagi tanaman dan diserap oleh tanaman untuk kelangsungan pertumbuhannya.

Berikut mekanisme reaksi kimia sesuai Gambar 10.5. Pembentukan kompleks asam-asam organik dan ion-ion Ca^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+}

❖ Reaksi:



berasal dari hidrolisis
asam-asam organik yang
dihasilkan MO Pelarut P



Gambar 10.5: Mekanisme Reaksi Kimia Pembentukan Kompleks Kation
(https://www.researchgate.net/figure/Gambar-53-Mekanisme-pelarutan-fosfat-oleh-bakteri-pelarut-fosfat-Zaidi-et-al-2009_fig2_357680441)

10.4 Produk Komersialisasi Mikroba di Bidang Pertanian di Pasar Dunia

Dengan pengembangan berbagai riset ilmu-ilmu pertanian telah ditemukan berbagai jenis mikroba tanah dan dikembangkan berpeluang besar untuk diperjualbelikan yakni: (1) mikroba penghasil zat pengatur tumbuh (2) kontrol

lingkungan biotik, (3) biodekomposer, dan (4) kereaktifan mikroba dalam penetral masalah lingkungan (Hopkins et al 2010 dalam Prihastuti (2016). Karakteristik keragaman kemampuan suatu mikroba sangat menentukan nilai jual dalam meningkatkan produktivitas tanaman, perbaikan kesuburan tanah, sebagai pengendali lingkungan biotik, perangsang kesuburan tumbuhan (Sandhu, et al.,2010 dalam Prihastuti, 2016).).

Tabel 10.1: Lembaga Internasional yang Menyediakan Isolat-isolat Mikroba

Singkatan	Nama Lembaga	Lokasi
ATCC	<i>American Type Culture Collection</i>	Rockville, MD, US
CBS	<i>Centraalbureau voor Schimmienl Culturen</i>	Baarn, The Netherlands
CDDA	<i>Canadian Department of Agriculture</i>	Ottawa, Canada
CMI	<i>Commonwealth Mycological Institute</i>	Kew, United Kingdom
FAT	<i>Faculty of Agriculture, Tokyo University</i>	Tokyo, Japan
IAM	<i>Institute of Applied Microbiology, University of Tokyo</i>	Tokyo, Japan
NCIB	<i>National Collection of Industrial Bacteria</i>	Aberdeen, Scotland
NCTC	<i>National Collection of Type Cultures</i>	London, United Kingdom
NRRL	<i>Northern Regional Research Laboratory</i>	Peoria, IL, United States
PCC	<i>Pasteur Culture Collection</i>	Paris, France

Tabel 10.2: Jenis-jenis Mikroba yang Berpotensi untuk Dikomersialisasikan (Kuhad, et al., 2008)

Nilai jual mikroba sebagai	Jenis-jenis mikroba
Dekomposer bahan organik	<i>Tricoderma, Fusarium, Bacillus, Streptomyces, Clostridium</i>
Penambat nitrogen simbiotik	<i>Rhizobium, Bradyrhizobium, Frankia, Anabaena</i>
Penambat nitrogen non simbiotik	<i>Azotobacter, Beijerinckia, Aerobacter, Chlorobium, Nostoc</i>
Mineralisasi nitrogen	<i>Bacillus, Pseudomonas, Serratia</i>
Nitrifikasi	<i>Nitrobacter, Nitrosomonas</i>
Denitrifikasi	<i>Achromobacter, Pseudomonas</i>
Pelarut fosfat	<i>Azotobacter, Enterobacter, Bacillus, Aspergillus, Penicillium,</i>

Berdasarkan data pada Tabel 10.2, bahwa jenis-jenis mikroba yang berpotensi untuk diperjualbelikan khususnya di Indonesia sesuai program pemerintah menuju swasembada pangan dan lingkungan sehat menjadikan peluang di pasar dunia akan kebutuhan mikroba dan produk mikroba akan sangat tinggi. Bahkan hasil kajian peneliti bahwa ditahun-tahun mendatang para pelanggan atau pengguna yang membutuhkan mikroba dan produk mikroba akan

bertambah banyak dan semakin luas peredarannya hingga ke pasar dunia. (Prihastuti (2016).

Berbagai asam organik yakni seperti asam formiat, asetat, propionat, laktat, glikolat, fumarat, dan suksinat yang dihasilkan oleh mikroorganisme yang dapat melarutkan fosfat dapat memecahkan masalah tanah pertanian untuk mengurangi pemupukan yang mengandung bahan-bahan kimia. Bahkan justru bermasalah dalam kegiatan pemupukan ketika ketersediaan pemupukan kimia terbatas. Metode rekombinan gen yang implementasinya langsung dilahan pertanian sejatinya sangat membantu peneliti mengkaji pengembangan seleksi, screening serta analisis recombinan suatu mikroba tanah untuk menghasilkan produk mikroba yang memiliki karakter lebih baik dari yang sebenarnya. (Sutarno, 2002).

Tabel 10.3: Beberapa Merk Pupuk Hayati di Indonesia (Prihastuti, 2008)

No.	Merk dagang	Komponen biologi	Produsen
1	M-Bio	Bakteri pelarut P, <i>Lactobacillus</i> sp, yeast dan <i>Azospirillum</i>	PT. Hayati Lestari, Tasikmalaya
2	OST-Rajawali	<i>Azotobacter</i> , <i>Agrobacterium</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Azospirillum</i> , <i>Rhizobium</i> , <i>Mycorrhiza</i>	PT. Rajawali Phara Jaya, Jakarta
3	ABG-Bios	Penambat N non-simbiotik, dan bakteri pelarut P	ABG-Team, Bangkit Pertanian Organik Indonesia
4	Emas	<i>Azospirillum lipoverum</i> , <i>Azotobacter beijerinckii</i> , <i>Aeromonas punctata</i> dan <i>Aspergillus niger</i>	PT. Bioindustri Nusantara, Purwakarta
5	Agrobost	Mikroba <i>indigenous</i> , <i>Azotobacter</i> , <i>Azospirillum</i> , mikroba pelarut P, <i>Lactobacillus</i> , mikroba selulolitik	CV. Agrindo Cipta Mandiri
6	Nodulin-Plus	<i>Azospirillum</i> , cendawan pelarut P	Balai Penelitian Bioteknologi Tanaman Pangan
7	Spora Jamur Mikoriza	Spora mikoriza <i>Gigaspora margarita</i>	Pusat Penelitian Perkebunan Jember
8	Technofert 2000	Mikoriza vesikular-arbuskular	BPP Teknologi, Serpong

Berdasarkan Tabel 10.3, bahwa prospek ke depannya pupuk hayati komersial di Indonesia berpeluang besar dalam pasar dunia yang pemanfaatannya digunakan pada berbagai bidang yakni sebagai (1) penyediaan bahan-bahan untuk mengurangi biaya pembelian (2) membantu pertumbuhan hasil pertanian yang lebih bersifat unggul (3) menghasilkan mikroorganisme transgenik yang berkarakter unggul sesuai pemanfaatannya, prospek masa depan terutama dalam pemenuhan unsur hara oleh mikroorganisme pelarut fosfat sangat membantu para petani masa depan. (Prihastuti, 2016).

Daftar Pustaka

- Aallam, Y., Dhiba, D., Lemriss, S., Souiri, A., Karray, F., Rasafi, T. E., ... & Hamdali, H. (2021) "Isolation and characterization of phosphate solubilizing *Streptomyces* sp. endemic from sugar beet fields of the Beni-Mellal region in Morocco," *Microorganisms*, 9(5), 914.
- Adu-Tae ASJ. (2004). Efisiensi Pemupukan Fosfat dan Hasil Kacang Tanah (*Arachis hypogaea* L.) Varietas Lokal Kupang Barat Akibat Pemberian Pupuk Fosfat, Kotoran Sapi, dan Bakteri Pelarut Fosfat. Disertasi untuk Memperoleh Gelar Doktor. Program Pascasarjana Universitas Padjadjaran Bandung.
- Afriani, M. et al. (2021) "Pengaruh Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) dan Pupuk Fosfor terhadap Pertumbuhan Tanaman Padi Sawah (*Oryza sativa* L.) yang ditanam secara SRI Modifikasi," *Agritrop: Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian (Journal of Agricultural Science)*, 19(2), hal. 84–98. doi: 10.32528/agritrop.v19i2.5814.
- Afzal A, Bano A. (2008). Rhizobium and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Int. J. Agric. Biol.* 10: 85–88.
- Ahmed, N., & Shahab, S. (2009). Phosphate solubilization: their mechanism genetics and application. *Internet J Microbiol*, 9(1).
- Ai, P. et al. (2009) "Two rice phosphate transporters, OsPht1;2 and OsPht1;6, have different functions and kinetic properties in uptake and translocation," *Plant Journal*, 57(5), pp. 798–809. doi: 10.1111/J.1365-313X.2008.03726.X.
- Alam S, Khalil S, Ayub N, Rashid M. (2022), "In vitro solubilization of inorganic phosphate by phosphate solubilizing microorganism (PSM) from maize rhizosphere," *Int. J. Agric, Biol.* 4: 454–458.
- Alawiah, S.D., Darmayasa, I.B.G. and Sundra, I.K. (2015) 'Isolasi dan Optimalisasi Pertumbuhan Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) pada Limbah

- Tahu Cair dengan Menggunakan Konsentrasi Karbon (C) yang Berbeda', *Journal of Biological Sciences*, 3(1), pp. 326–329.
- Alexander, M. (1977). "Introduction to Soil Microbiology," 2nd edition. John Wiley and Sons. New York.
- Ali, A., Junda, M., Sjahid, F., & Rante, H. (2020) "Peningkatan produktivitas tanaman singkong melalui bioaugmentasi tanah menggunakan Actinomycetes dan Fungi Pelarut Fosfat," *Jurnal Agrobiogen*, 16(2), pp. 89-96.
- Alori, E., Fawole, O. and Afolayan, A. (2012) "Characterization of Arbuscular Mycorrhizal Spores Isolated from Southern Guinea Savanna of Nigeria," *Journal of Agricultural Science*, 4(7). doi: 10.5539/JAS.V4N7P13.
- Alori, E., Glick, B. and Babalola, O. (2017) "Microbial Phosphorus Solubilization and Its Potential for Use in Sustainable Agriculture," *Frontiers in Microbiology*, 8(971), pp. 1–8. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2017.00971/full> (Accessed: March 15, 2023).
- Amna et al. (2020) 'Multi-stress tolerant PGPR *Bacillus xiamenensis* PM14 activating sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) red rot disease resistance', *Plant Physiology and Biochemistry*, 151, pp. 640–649. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.016>.
- Amri, M. et al. (2022) 'Co-Inoculation with Phosphate-Solubilizing Microorganisms of Rock Phosphate and Phosphogypsum and Their Effect on Growth Promotion and Nutrient Uptake by Ryegrass', *Applied Biosciences*, 1(2), pp. 179–197. doi:10.3390/applbiosci1020012.
- Anand, K., Kumari, B. and Mallick, M.A. (2016) 'Phosphate Solubilizing Microbes: An Effective and Alternative Approach as Biofertilizers Review Article'. Available at: <http://www.springerplus.com/content/2/1/587>.
- Anand, K., Kumari, B. and Mallick, M.A. (2016) 'Phosphate solubilizing microbes: An effective and alternative approach as biofertilizers', *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 8(2), pp. 37–40.
- Anas, I. dan V. D. Rakhmadina. (2012). "Effect of oligochitosan, vitazyme, biofertilizer on growth and yield of rice," *FNCA Biofertilizer Newsletter*,

- Forum of Nuclear Cooperation in Asia (FNCA) Biofertilizer Project, 1, hal. 5-6.
- Andayanto, E. dan K. Hairiah. (2007). *Biologitanah: landasan pengelolaan tanah sehat*. Pustaka Adipura, Yogyakarta.
- Anith, K. N., Nysanth, N. S., & Natarajan, C. (2021) "Novel and rapid agar plate methods for in vitro assessment of bacterial biocontrol isolates antagonism against multiple fungal phytopathogens," *Letters in Applied Microbiology*, 73(2), pp. 229-236.
- Arai, Y. and Sparks, D. L. (2007) "Phosphate Reaction Dynamics in Soils and Soil Components: A Multiscale Approach," *Advances in Agronomy*, 94, pp. 135–179. doi: 10.1016/S0065-2113(06)94003-6.
- Aruna, K., Rao, D. and Munawar, T. (2017) 'Purification and Characterization of Cholesterol Oxidase From Novel Native Isolate *Bacillus Subtilis* Ys01 Isolated From Meat Sample', *International Journal of Biology, Pharmacy and Allied Sciences (IJBPAS)*, 6(August), pp. 1578–1588.
- Aseri GK, Jain N, Tarafdar JC. (2009). Hydrolysis of organic phosphate forms by phosphatases and phytase producing fungi of arid and semi-arid soils of India," *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5: 564–570.
- Asril, M. and Lisafitri, Y. (2019) "Amount of soil phosphate solubilizing bacteria in the Reservoir of ITERA and its environmental conditions.," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics Publishing, p. 012026. doi: 10.1088/1755-1315/258/1/012026.
- 3 Asril, M. and Lisafitri, Y. (2020) "Isolasi Bakteri Pelarut Fosfat Genus *Pseudomonas* dari Tanah Masam Bekas Areal Perkebunan Karet di Kawasan Institut Teknologi Sumatera," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(1), pp. 40–48. doi: 10.29122/jtl.v21i1.3743.
- Asril, M. et al. (2022) *Ilmu Tanah*. Edited by M. Sirait. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Asril, M. et al. (2023) *Kesuburan dan Pemupukan Tanah*. 1 ed. Diedit oleh M. J. F. Sirait. Yayasan Kita Menulis.
- Asril, M., Lisafitri, Y, et al. (2021) "Isolation, population, and selection of phosphate solubilizing bacteria from acid soils of Institut Teknologi Sumatera' s Region, Lampung," in *IOP Conference Series: Earth and*

- Environmental Science. Lampung: IOP Publisihing, pp. 1–7. doi: 10.1088/1755-1315/830/1/012016.
- Asril, M., Lisafitri, Yuni, et al. (2021) “Assessment of Phosphate Solubilization and Indole Acetic Acid Production of Phosphate Solubilizing Bacteria Isolated from Acid Soils, Lampung, Indonesia,” Proceedings of the 3rd KOBICONG, International and National Conferences (KOBICINC 2020), 14, pp. 469–477. doi: 10.2991/ABSR.K.210621.080.
- Atieno, M. et al. (2020) ‘Assessment of biofertilizer use for sustainable agriculture in the Great Mekong Region’, Journal of Environmental Management, 275, p. 111300. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111300>.
- Azziz, G. et al. (2012) “Abundance, diversity and prospecting of culturable phosphate solubilizing bacteria on soils under crop-pasture rotations in a no-tillage regime in Uruguay,” Applied Soil Ecology, 61, pp. 320–326. doi: 10.1016/J.APSOIL.2011.10.004.
- Babu-Khan, S., Yeo, T. C., Martin, W. L., Duron, M. R., Rogers, R. D., & Goldstein, A. H. (1995). Cloning of a mineral phosphate-solubilizing gene from *Pseudomonas cepacia*. Applied and environmental microbiology, 61(3), 972-978.
- Bai, Y.-C. et al. (2020) ‘Soil Chemical and Microbiological Properties Are Changed by Long-Term Chemical Fertilizers That Limit Ecosystem Functioning’, Microorganisms, 8(5), p. 694. Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8050694>.
- Basuki and Winarso, S. (2021) ‘Peta Sebaran pH Tanah, Bahan Organik Tanah, dan Kapasitas Pertukaran Kation sebagai Dasar Rekomendasi Aplikasi Bahan Organik dan Dolomit pada Lahan Tebu’, Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri, 13(2), pp. 78–93. doi: 10.21082/btsm.v13n2.2021.78-93.
- Basuki et al. (2015) ‘Analisis Cluster Sebaran Hara Makro dan Rekomendasi Pemupukan untuk Tanaman Tebu (*Saccharum officinarum* Linn .) Cluster Analysis of Macro Nutrient Distribution and Fertilization Recommendations for Sugarcane (*Saccharum officinarum* Linn .)’, Ilmu Pertanian, 18(3), pp. 118–126.
- Basuki et al. (2021) ‘Pemberdayaan Masyarakat Desa Sukamakmur Kabupaten Jember dalam Budidaya Lobster Air Tawar’.

- 3 Basuki, B. (2020) 'Pemetaan Tipologi Dan Kesesuaian Varietas Tanaman Tebu Berdasarkan Karakteristik Lahan Dan Tanah Di Jatiroto Lumajang', *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 12(1), p. 34. doi: 10.21082/btsm.v12n1.2020.34-44.
- Basuki, B. and Sari, V. K. (2020) 'Efektifitas Dolomit Dalam Mempertahankan pH Tanah Inceptisol Perkebunan Tebu Blimbing Djatiroto', *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 11(2), p. 58. doi: 10.21082/btsm.v11n2.2019.58-64.
- 3 Basuki, B. et al. (2022) 'Evaluation of the suitability of a sugarcane plant in mount argopura's volcanic land using a geographic information system', *Jurnal Ilmiah Rekayasa Pertanian dan Biosistem*, 10(1), pp. 145–160. doi: 10.29303/jrpb.v10i1.315.
- Basuki, B. et al. (2023) 'Teknologi Penataan Pola Tanam Padi Sawah Berdasarkan Karakteristik Iklim Di Lahan Sub Optimal Das Sampian Lereng Gunung Ijen', *Jurnal Agrotek Tropika*, 11(1), pp. 159–168.
- Basuki, B., Sari, V. K. and Tanzil, A. I. (2022) 'Pelatihan Pemanfaatan Limbah Pertanian Sebagai Pupuk dan Mulsa Organik Bagi Kelompok Tani Harapan Desa Slateng Ledokombo Menuju Zero Waste', *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(3), pp. 1–6.
- Basuki, B., Vega Kartika Sari and Marga Mandala (2022) 'Pemanfaatan Bahan Organik Sebagai Solusi Solum Tanah Dangkal di Desa Slateng Kecamatan Ledokombo Kaki Gunung Raung', *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(1), pp. 208–213. doi: 10.29303/jpmipi.v5i1.1407.
- 5 Beauchamp, E.G. and D.J. Hume. (1997). "Agricultural soil manipulation: The use of bacteris, manuring, and plowing," hal. 643-664. In J.D. van Elsas, J.T. Trevors, and E.M.H. Wellington (Eds.). *Modern Soil Microbiology*. Marcel Dekker, New York.
- Berza, B. et al. (2022) 'Evaluation of inorganic phosphate solubilizing efficiency and multiple plant growth promoting properties of endophytic bacteria isolated from root nodules *Erythrina brucei*', *BMC Microbiology*, 22(1), pp. 1–16. doi:10.1186/s12866-022-02688-7.
- Bharwad, K. and Rajkumar, S. (2020) 'Modulation of PQQ-dependent glucose dehydrogenase (mGDH and sGDH) activity by succinate in phosphate

- solubilizing plant growth promoting *Acinetobacter* sp. SK2', 3 Biotech, 10(1), p. 5. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13205-019-1991-2>.
- Bhatta, S., Janezic, T.S. and Ratti, C. (2020) 'Freeze-Drying of Plant-Based Foods', pp. 1–22.
- Bhattacharyya, P. N. and Jha, D. K. (2012) "Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Emergence in agriculture," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(4), pp. 1327–1350. doi: 10.1007/S11274-011-0979-9.
- Bhodiwal, S. and Barupal, T. (2022) 'Phosphate solubilizing microbes: an incredible role for plant supplements', *MOJ Ecology & Environmental Sciences*, 7(5), pp. 170–172. doi:10.15406/mojes.2022.07.00263.
- Boubekri, K., Soumare, A., Mardad, I., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2021) "The screening of potassium-and phosphate-solubilizing actinobacteria and the assessment of their ability to promote wheat growth parameters," *Microorganisms*, 9(3), 470.
- Brígido, C. et al. (2019) 'Mediterranean native leguminous plants: A reservoir of endophytic bacteria with potential to enhance chickpea growth under stress conditions', *Microorganisms*, 7(10). Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms7100392>.
- Brundrett, M. et al. (1996) *Working with Mycorrhizas in Forestry and Agriculture*. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research. doi: 10.13140/2.1.4880.5444.
- Chen, G. C. and He, Z. L. (2002) "Microbial biomass phosphorus turnover in variable-charge soils in China," *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 33(13–14), pp. 2101–2117. doi: 10.1081/CSS-120005751.
- Chen, P. H., Chen, R. Y., & Chou, J. Y. (2018) "Screening and evaluation of yeast antagonists for biological control of *Botrytis cinerea* on strawberry fruits," *Mycobiology*, 46(1), pp. 33–46.
- Chen, Y. P., Rekha, P. D., Arun, A. B., Shen, F. T., Lai, W. A., dan Young, C. C. (2006). "Phosphate solubilizing bacteria from subtropical soil and
- Chen, Y.R. et al. (2023) 'Plant growth-promoting properties of the phosphate-solubilizing red yeast *Rhodospiridium paludigenum*', *World Journal of*

- Microbiology and Biotechnology, 39(2), pp. 1–12. doi:10.1007/s11274-022-03498-9.
- Choirunnisa, Zul, D. and Pratiwi, N.W. (2017) 'Formulasi Mikroorganisme Lignoselulolitik Asal Tanah Gambut Desa Rimbo Panjang , Kampar Sebagai Bioaktivator Bentuk Padat', Jurnal Riau Biologia, 2(2), pp. 90–99.
- Citraesmini, A. and Bachtiar, T. (2016) 'Dinamika Fosfat Pada Aplikasi Kompos Jerami-Biochar dan Pemupukan Fosfat Pada Tanah Sawah', Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi, 12(2), pp. 133–146. doi:10.17146/jair.2016.12.2.3547.
- Clermont-Dauphin, C. et al. (2014) 'Cropping Systems to Improve Soil Biodiversity and Ecosystem Services: The Outlook and Lines of Research', in, pp. 117–158. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-319-06016-3_5.
- Dandessa, C., & Bacha, K. (2018) "Review on Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture," Int J Curr Res Acad Rev, 6(11), pp. 48-55.
- Das, K. C., Das, S. K., & Panda, D. (2010). Improvement of phosphate solubilization and plant growth promotion by an acid phosphatase-producing isolate of *Acinetobacter* sp. K51. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 26(12), 2267-0
- Devau, N. et al. (2009) "Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: Experimental and mechanistic modelling approaches," Applied Geochemistry, 24(11), pp. 2163–2174. doi: 10.1016/J.APGEOCHEM.2009.09.020.
- Dewi, P. (2009) 'Ketahanan Hidup Sel *Acetobacter xylinum* pada Pengawetan secara Kering-Beku Menggunakan Medium Pembawa (Viability of *A. xylinum* Subjected to Freeze Drying Using Carrier Media)', Biosaintifika: Journal of Biology & Biology Education, 1(1), pp. 41–48.
- Dhuldhaj, U. and Malik, N. (2022) 'Global perspective of phosphate solubilizing microbes and phosphatase for improvement of soil, food and human health', Cellular, Molecular and Biomedical Reports, 2(3), pp. 173–186. Available at: <https://doi.org/10.55705/cmbr.2022.347523.1048>.

- Diagne, N. et al. (2020) 'Effect of Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) and Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) on Salt Stress Tolerance of *Casuarina obesa* (Miq.)', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4. Available at: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.601004>.
- Dinh, M. Van et al. (2017) "Release of phosphorus from soil bacterial and fungal biomass following drying/rewetting," *Soil Biology and Biochemistry*, 110, pp. 1–7. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2017.02.014.
- Doberman, A., T. Fairhurst. (2000). *Nutrient Disorders and Nutrient Management*. International Rice Research Institute, Manila, Philippines.
- Dodor DE, Tabatabai MA. (2003). Effect of cropping systems on phosphatases in soils. *J. Plant Nutr. Soil. Sci.*, 166: 7–13.
- Doilom, M. et al. (2020) 'Screening of Phosphate-Solubilizing Fungi from Air and Soil in Yunnan, China: Four Novel Species in *Aspergillus*, *Gongronella*, *Penicillium*, and *Talaromyces*', *Frontiers in Microbiology*, 11. Available at: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.585215>.
- Effendi, M. (2008). Perbaikan ketersediaan P dan efisiensi serapan P oleh tanaman bawang prei dengan pemberian asam-asam organik dan CMA pada tanah. *Buana sains* vol. 8 (1) : 51-56.
- Basri, H. (2013) "Landasan pendidikan," Bandung: Pustaka Setia.
- Ehlers, K. et al. (2010) "Phosphorus limitation in a Ferralsol: Impact on microbial activity and cell internal P pools," *Soil Biology and Biochemistry*, 42(4), pp. 558–566. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2009.11.025.
- Elhaissoufi, W., Ghoulam, C., Barakat, A., Zeroual, Y., & Bargaz, A. (2022) "Phosphate bacterial solubilization: A key rhizosphere driving force enabling higher P use efficiency and crop productivity," *Journal of Advanced Research*, 38, pp. 13-28.
- Erktan, A., Or, D. and Scheu, S. (2020) 'The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions', *Soil Biology and Biochemistry*, 148, p. 107876. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107876>.
- Fahmi, A., Radjagukguk, B. and Purwanto, B. H. (2013) 'Kelarutan Fosfat dan Ferro pada Tanah Sulfat Masam yang Diberi Bahan Organik Jerami

- Padi', *Journal of Tropical Soils*, 14(2), pp. 119–125. doi: 10.5400/jts.2009.v14i2.119-125.
- Febriyansah, F., Lumbantoruan, S. M. dan Paulina, M. (2023) "Aplikasi Formula Pupuk Hayati dengan Intensitas Penyiraman terhadap Pertumbuhan dan Produksi Tanaman Jagung (*Zea mays* L) pada Tanah Gambut," *Jurnal Pertanian Agros*, 25(1), hal. 741–750. Tersedia pada: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=id&user=JSn_HxEAAAJ&citation_for_view=JSn_HxEAAAJ:hqOjcs7Dif8C.
- Ferraz Jardim, A. M. da R. et al. (2018) "Symbiotic interaction in forage crop cultivations: A review," *Amazonian Journal of Plant Research*, 2(1), pp. 149–160. doi: 10.26545/AJPR.2018.B00019X.
- Fijan, S. (2016) "Antimicrobial effect of probiotics against common pathogens," *Probiotics and prebiotics in human nutrition and health*, 10, 5772.
- 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, hal.101–107.
- Fitriatin, B.N. et al. (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', *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 6. doi:10.3389/fsufs.2022.1032708.
- Fiuza, D.A.F. et al. (2022) 'Effect of Rhizobacteria Inoculation via Soil and Seeds on Glycine max L. Plants Grown on Soils with Different Cropping History', *Microorganisms*, 10(4), p. 691. Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10040691>.
- Foth, H. D. dan Ellis, B. D. (1997) *Soil Fertility*. 2 ed. Boca Raton: Lewis Publisher.
- Gao, Y. et al. (2020) 'Polyphosphate fertilizers increased maize (*Zea mays* L.) P, Fe, Zn, and Mn uptake by decreasing P fixation and mobilizing microelements in calcareous soil', *Journal of Soils and Sediments*, 20(1), pp. 1–11. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02375-7>.

- 5 Gerretsen, F.C. (1948). "The influence of microorganism on the phosphorus uptake by the plant," *Plant Soil*, 1, hal.51-81.
- Ghosh, M., & Majumder, A. L. (2016). Significance of alkaline and acid phosphatases in the diagnosis of human diseases. *Journal of Clinical Pathology*, 69(5), 367-374. <https://doi.org/10.1136/jclinpath-2015-203492>
- 5 Goenadi, D.H., R. Saraswati, dan Y. Lestari. (1993). Kemampuan melarutkan fosfat dari beberapa isolat bakteri asal tanah dan pupuk kandang sapi. *Menara Perkebunan* 61(2): 44-49
- Goldstein, A. (1986). Bacterial solubilization of mineral phosphates: Historical perspective and future prospects. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(2), 51-57. doi:10.1017/S0889189300000886
- Goldstein, A. H., Braverman, K., & Osorio, N. (1999). Evidence for mutualism between a plant growing in a phosphate-limited desert environment and a mineral phosphate solubilizing (MPS) rhizobacterium. *FEMS microbiology ecology*, 30(4), 295-300.
- Goosen, N., Horsman, H. P., Huinen, R. G., & Van de Putte, P. (1989). *Acinetobacter calcoaceticus* genes involved in biosynthesis of the coenzyme pyrrolo-quinoline-quinone: nucleotide sequence and expression in *Escherichia coli* K-12. *Journal of bacteriology*, 171(1), 447-455.
- Goswami, S., Dubey, A.N. and Singh, N. (2019) Role of phosphorus solubilizing microorganisms and dissolution of insoluble phosphorus in soil Agriculturally important microbes (AIMs) for sustainable agriculture View project. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/336220599>.
- Groffman, P. M., Hendrix, P. F. and Crossley, D. A. (1987) "Effects of a winter legume on phosphorus, potassium, calcium and magnesium cycling in a humid subtropical agroecosystem," *Agric Ecosyst Environ*, 18(4), pp. 281–289. doi: 10.1016/0167-8809(87)90095-8.
- Guerra, C.A. et al. (2020) 'Blind spots in global soil biodiversity and ecosystem function research', *Nature Communications*, 11(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17688-2>.

- 5
Gunarto, L. dan L. Nurhayati. (1994). Karakterisasi dan identifikasi bakteri pelarut fosfat pada tanah-tanah di Indonesia. Makalah disampaikan pada Seminar Tahunan 1994 Hasil Penelitian Tanaman Pangan, Balai Penelitian Tanaman Pangan Bogor, 29-30 Maret 1994.
- Hallama, M. et al. (2019) "Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems," *Plant and Soil*, 434(1–2), pp. 7–45. doi: 10.1007/S11104-018-3810-7.
- Hanafiah, A. S., T. Sabrina, dan H. Guchi. (2009). *Biologi dan Ekologi Tanah*. Universitas Sumatera Utara. Medan.
- Harni, R. and Samsudin, . (2015) 'Pengaruh Formula Bionematisida Bakteri Endofit *Bacillus* sp. terhadap Infeksi Nematoda *Meloidogyne* sp. pada Tanaman Kopi', *Jurnal Tanaman Industri dan Penyegar*, 2(3), p. 143. doi:10.21082/jtidp.v2n3.2015.p143-150.
- Hartati, R. D., Suryaman, M. dan Saepudin, A. (2023) "Pengaruh Pemberian Bakteri Pelarut Fosfat pada Berbagai pH Tanah terhadap Pertumbuhan dan Hasil Kedelai (*Glycine max* (L .) Merr)," *JA-CROPS-Journal of Agrotechnology and Crop Science*, 1(1), hal. 26–34. Tersedia pada: <https://jurnal.unsil.ac.id/index.php/jacrops/article/view/2782/1647>.
- Haryanti D, Zul D, Fibriarti BL. (2014) "Formulasi pupuk hayati serbuk menggunakan bakteri pelarut fosfat indigenus asal tanah gambut Riau dalam berbagai bahan pembawa," *JOM FMIPA*, 1(2), pp. 562-570.
- Hasanudin dan M. B. Gonggo. (2004). Pemanfaatan mikrobial pelarut fosfat dan mikoriza untuk perbaikan fosfor tersedia, serapan fosfor tanah (ultisol) dan hasil jagung (pada ultisol). *Jurnal Ilmu-Ilmu Pertanian Indonesia*, 6(1): 8-13.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. (1999). "Soil Fertility and Fertilizers," *An Introduction to Nutrient Management*. Sixth Ed. New Jersey: Prentice Hall.
- Hidayati, U dan T. Wijaya. (2009). Pemanfaatan bakteri pelarut fosfat untuk meningkatkan pertumbuhan tanaman karet. *Jurnal Penelitian Karet*. 27(1): 42-48 Pada
- Hidayati, U. (2005). Peranan mikroorganisme tanah dalam meningkatkan serapan nitrogen pada berbagai tingkatan ketersediaan air tanah. *Jurnal Penelitian Karet*, 23(2): 156-166.

- Hindersah, R. et al. (2018) "Bakteri Pemfiksasi Nitrogen Azotobacter sebagai Pupuk Hayati dan Pengendali Penyakit pada Tanaman Kacang Panjang," *Agric*, 30(1), hal. 25–32.
- Hirota, R. et al. (2010) "Bacterial phosphate metabolism and its application to phosphorus recovery and industrial bioprocesses," *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 109(5), pp. 423–432. doi: 10.1016/J.JBIOSEC.2009.10.018.
- 5 Hue N.V., G.R. Craddock, F. Adams. (1986). "Effect of organic acids on aluminium toxicity in subsoil," *Soil Sci. Soc. Am J.*, 50.
- Husen, R., R. Stakaranwati, dan R. D. Hastuti. (2006). "Rhizobakteri Pemacu Tumbuh Tanaman Dalam Pupuk Organik dan Pupuk Hayati". Balai Penelitian Tanah, hal. 191-209.
- Ichriani, G.I., Fahrunsyah and Handayanto, E. (2018) 'Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Sumber Fungi Pelarut Fosfat Indigenus Dan Media Pembawa Fungi Oil Palm Empty Fruit Bunches as Indigenous Solubilizing Phosphate Fungi Resources and Medium of Fungi Carrier', *Prosiding Seminar Nasional Lingkungan Lahan Basah*, 3(April), pp. 263–266.
- Idriss, E. E., Makarewicz, O., Farouk, A., Rosner, K., Greiner, R., Bochow, H., ... & Borriss, R. (2002). Extracellular phytase activity of *Bacillus amyloliquefaciens* FZB45 contributes to its plant-growth-promoting effect. *Microbiology*, 148(7), 2097-2109.
- Illmer, P. and F. Schinner. (1992). "Solubilization of inorganic phosphate by microorganisms isolated from forest soils," *Soil Biol. Biochem*, 24(4): 389-395.
- Ilyas, M., Kanti, A. and Rahmansyah, M. (2007) *Teknik Preservasi Fungi*. I. Edited by M. Ilyas. Jakarta: LIPI Press, Anggota IKAPI.
- 3 Ingle, K. P. and Padole, D. A. (2017) "Phosphate Solubilizing Microbes: An Overview," *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(1), pp. 844–852. doi: 10.20546/IJCMAS.2017.601.099.
- Irawan, R., & Zulaika, E. (2016) "Pelarutan Fosfat oleh Konsorsium Azotobacter," *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 5(2), PP. E74-E76.
- 3 Istina, I. N., Widiastuti, H., Joy, B., & Antralina, M. (2015). "Phosphate-solubilizing Microbe from Saprist Peat Soil and their Potency to

- Enhance Oil Palm Growth and P Uptake,” *Procedia Food Science* , 3, hal. 426-435.
- 6 Jones, U.S. (1982). “Fertilizers and Soil Fertility,” 2nd ed. Virginia: Reston Publ. Co. Reston.
- Jurnal Litbang Pertanian, 25(2): 55-60. Roni N. G. K, N.M. Witariadi, N.N Candraasih K., dan N. W SitiPemanfaatan Bakteri Pelarut Fosfat untuk Meningkatkan Produktivitas Kudzu Tropika (*Pueraria phaseoloides* Benth.) pastura Vol. 3 No. 1 : 13 - 16 ISSN : 2088-818X
- Kalayu G. (2019). Phosphate Solubilizing Microorganisms: Promising Approach as Biofertilizers. *International Journal of Agronomy* Vol. 2019, Article ID 4917256, 7 pages.
- Kang, J. et al. (2011) “Phosphorus leaching in a sandy soil as affected by organic and inorganic fertilizer sources,” *Geoderma*, 161(3–4), pp. 194–201. doi: 10.1016/J.GEODERMA.2010.12.019.
- Karamina, H. et al. (2020) ‘Respons pertumbuhan dan hasil tanaman mentimun terhadap aplikasi pupuk NPK dan pupuk organik cair kaya fosfat’, *Kultivasi*, 19(2), pp. 1150–1155. doi: 10.24198/kultivasi.v19i2.26316.
- Karl, D. M. (2014) “Microbially mediated transformations of phosphorus in the sea: New views of an old cycle,” *Annual Review of Marine Science*, 6, pp. 279–337. doi: 10.1146/ANNUREV-MARINE-010213-135046.
- Kaur, A., & Subramanian, S. (2017). Acid phosphatases in *Bacillus subtilis*: a review. *Journal of Applied Microbiology*, 122(2), 295-311. <https://doi.org/10.1111/jam.13340>
- Khaeruni, A. et al. (2022) ‘Viability and Inhibition of Endophytic Bacteria *Pseudomonas fluorescens* 4RS1 Against *Phytophthora palmivora* in Flour Formula’, *Jurnal Fitopatologi Indonesia*, 18(4), pp. 145–152. doi:10.14692/jfi.18.4.145-152.
- Khan A, Jilani V, Akhtar MS, Naqvi SMS, Rasheed M. (2009). Phosphorus solubilizing bacteria: occurrence, mechanisms and their role in crop production. *J. Agric. Biol. Sci.* 1: 48–58.
- Khan, K. S. and Joergensen, R. G. (2009) “Changes in microbial biomass and P fractions in biogenic household waste compost amended with inorganic

- P fertilizers,” *Bioresource Technology*, 100(1), pp. 303–309. doi: 10.1016/J.BIORTECH.2008.06.002.
- Khan, M. S., Zaidi, A. and Wani, P. A. (2007) “Role of phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture — A review,” *Agronomy for Sustainable Development* 27:1, 27(1), pp. 29–43. doi: 10.1051/AGRO:2006011.
- Kim, K. Y., McDonald, G. A., & Jordan, D. (1997). Solubilization of hydroxyapatite by *Enterobacter agglomerans* and cloned *Escherichia coli* in culture medium. *Biology and Fertility of Soils*, 24(4), 347–352.
- Kimura R, Nishio M, Katoh K. (1990). Utilization of Phosphorus by Plant After Solubilization by Phosphate Solubilizing Microorganisms in Soil. National Grassland Research Institute. Nasu, Japan and National Agriculture Research Center. Tsukuba, Japan.
- Koesrini dan E. William. (2009). “Pengaruh bahan amelioran terhadap pertumbuhan dan hasil tiga varietas buncis di atas sistem surjan pada lahan sulfat masam potensial,” *J. Agrom. Indonesia*, 37(1), hal. 34–39.
- Kulaev, I. S. and Vagabov, V. M. (1983) “Polyphosphate Metabolism in Micro-Organisms,” *Advances in Microbial Physiology*, 24(C), pp. 83–171. doi: 10.1016/S0065-2911(08)60385-9.
- Kumar, Amarjeet, Kumar, Ajeet and Patel, H. (2018) ‘Role of Microbes in Phosphorus Availability and Acquisition by Plants’, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(05), pp. 1344–1347. Available at: <https://doi.org/10.20546/ijemas.2018.705.161>.
- 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*, 7(1), hal. 432–437.
- Kumar, V., & Sinha, A. K. (2018). General aspects of phytases. In *Enzymes in human and animal nutrition* (pp. 53–72). Academic Press.
- Kuroda, A. et al. (1997) “Guanosine tetra- and pentaphosphate promote accumulation of inorganic polyphosphate in *Escherichia coli*,” *Journal of Biological Chemistry*, 272(34), pp. 21240–21243. doi: 10.1074/JBC.272.34.21240.

- Kushwaha, P. et al. (2020) 'Plant growth promoting and antifungal activity in endophytic *Bacillus* strains from pearl millet (*Pennisetum glaucum*)', *Brazilian Journal of Microbiology*, 51(1), pp. 229–241. Available at: <https://doi.org/10.1007/s42770-019-00172-5>.
- Larasati, E.D. et al. (2018) 'Isolasi dan Identifikasi Bakteri Pelarut Fosfat dari Tanah Gambut', *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 20(1), p. 1. doi:10.14710/bioma.20.1.1-8.
- Lertcanawanichakul, M., & Sawangnop, S. (2008) "A comparison of two methods used for measuring the antagonistic activity of *Bacillus* species," *Walailak Journal of Science and Technology (WJST)*, 5(2), pp. 161–171.
- Lumbantoruan, S. M. et al. (2022) "Peranan Pupuk Hayati Mikoriza dan Azolla terhadap Tanaman Sorgum di Tanah Suboptimal," *Jurnal Pertanian Agros*, 24(3), hal. 1329–1337. Tersedia pada: <https://e-journal.janabadra.ac.id/index.php/JA/article/view/2253/1518>.
- Machmud, M. (2001) 'Teknik Penyimpanan dan Pemeliharaan Mikroba', *Jurnal Tinjauan Ilmiah Riset Biologi dan Bioteknologi Pertanian*, 4(2), pp. 24–32.
- Maharajan, T. et al. (2018) "Utilization of molecular markers for improving the phosphorus efficiency in crop plants," *Plant Breeding*, 137(1), pp. 10–26. doi: 10.1111/PBR.12537.
- Mariska, I. dan Husni, A. (2006) Perbaikan Sifat Genotipe Melalui Fusi Protoplas Pada Tanaman Lada, Nilam, Dan Terung.
- Marta Ritonga*, Bintang, Mariani Sembiring. (2015). Perubahan Bentuk P Oleh Mikroba Pelarut Fosfat dan Bahan Organik Terhadap P-tersedia dan Produksi Kentang (*Solanum tuberosum* L.) pada Tanah Andisol Terdampak Erupsi Gunung Sinabungeru
- Meulenberg, J. J. M., Sellink, E., Riegman, N. H., & Postma, P. W. (1992). Nucleotide sequence and structure of the *Klebsiella pneumoniae* pqq operon. *Molecular and General Genetics MGG*, 232, 284–294.
- Mnkeni, P. N. S. and MacKenzie, A. F. (1985) "Retention of ortho- and polyphosphates in some quebec soils as affected by added organic residues and calcium carbonate," *Canadian Journal of Soil Science*, 65(3), pp. 575–585. doi: 10.4141/CJSS85-061.

- Moradali, M. F. and Rehm, B. H. A. (2020) "Bacterial biopolymers: from pathogenesis to advanced materials," *Nature Reviews Microbiology*, 18(4), pp. 195–210. doi: 10.1038/S41579-019-0313-3.
- Morris, C. J., Biville, F., Turlin, E., Lee, E., Ellermann, K., Fan, W. H., ... & Lidstrom, M. E. (1994). Isolation, phenotypic characterization, and complementation analysis of mutants of *Methylobacterium extorquens* AM1 unable to synthesize pyrroloquinoline quinone and sequences of pqqD, pqqG, and pqqC. *Journal of bacteriology*, 176(6), 1746-1755.
- Muhammad Asghar Malik (2012) "Phosphorus fractions, microbial biomass and enzyme activities in some alkaline calcareous subtropical soils," *African Journal of Biotechnology*, 11(21). doi: 10.5897/AJB11.3483.
- Muis, A., Djaenuddin, N. and Nonci, N. (2016) 'Evaluasi Lima Jenis Inner Carrier Dan Formulasi *Bacillus Subtilis* Untuk Pengendalian Hawar Pelepah Jagung (*Rhizoctonia Solani* Kuhn)', *Jurnal Hama Dan Penyakit Tumbuhan Tropika*, 15(2), p. 164. doi:10.23960/j.hptt.215164-169.
- Mukhlis. (2011). Tanah Andisol. Genesis, klasifikasi, karakteristik, penyebaran dan analisis. USU Press. Medan
- Mullen DM. (1998). Transformation of other elements. p. 369-386. In Silvia DM, Fuhrmann JJ, Hartel PG, Zuberer DA (Eds.) *Principles and Applications of Soil Microbiology* Prentice Hall New Jersey 07458.
- Munawar, A. (2011) *Kesuburan Tanah dan Nutrisi Tanaman*. 1 ed. Bogor: IPB Press.
- Musafa, M. K., Aini, L. Q. dan Prasetya, B. (2015) "Peran Mikoriza Arbuskula dan Bakteri *Pseudomonas fluorescens* dalam Meningkatkan Serapan P dan Pertumbuhan Tanaman Jagung pada Andisol," *Tanah dan Sumberdaya lahan*, 2(2), hal. 191–197.
- 5 Nagrajah, S., A.M. Posneer, and J.P. Quirk. (1970). "Description of phosphate from kaolinite by citrate and bicarbonate," *Soil Sci. Am. J.* 32, hal. 507-510.
- Naumova, N. et al. (2022) 'Soil Mycobiome Diversity under Different Tillage Practices in the South of West Siberia', *Life*, 12(8), p. 1169. Available at: <https://doi.org/10.3390/life12081169>.
- Nautiyal SC. 1999. An efficient microbiological growth medium for screening phosphate solubilizing microorganisms. *FEMS Letters*. 170: 265 – 270.

- Neneng, L. (2020) "Formulation of liquid biofertilizer for enhance of soil nutrients in peatland," Budapest International Research in Exact Sciences (BirEx) Journal, 2(3), pp. 314-322.
- Nesme, T., Metson, G. S. and Bennett, E. M. (2018) "Global phosphorus flows through agricultural trade," Global Environmental Change, 50, pp. 133–141. doi: 10.1016/J.GLOENVCHA.2018.04.004.
- Noviana, L. and Raharjo, B. (2009) 'Viabilitas Rhizobakteri Bacillus sp. DUCC-BR-K1.3 pada media pembawa tanah gambut disubstitusi dengan padatan limbah cair industri rokok', Bioma, 11(1), pp. 30–39.
- Nuraisya, Yosep Soge Pata'dungan and Uswah Hasanah (2020) 'Bakteri Pelarut Fosfat Indigen Rizosfer Kopi (coffea sp.) Dan Paitan (Tithonia diversifolia): Kemampuan Melarutkan Fosfat Dalam Media Pikovskaya Cair Indigenous Phosphate-dissolving Bacteria of Coffee (Coffea sp.) and Mexican sun flower (Tithonia diversif', e-J.Agrotekbis 8, 8(3), pp. 483–491.
- Nurcahyorora, A. K. dan Srinivasan, R. (2011) "Diktat Bioteknologi Jurusan Pendidikan Biologi Pakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Negeri Yogyakarta. Jurnal Agroekoteknologi . E-ISSN No. 2337- 6597 Vol.4. No.1, Desember 2015. (551) :1641- 1650
- Nurhayati, D. R. (2021) Pengantar Nutrisi Tanaman. 1 ed, Syiah Kuala University. 1 ed. Diedit oleh H. Wijayati. Surakarta: UNISRI Press. Tersedia pada: https://press.unisri.ac.id/wp-content/uploads/2021/02/A5_PENGANTAR-NUTRISI-TANAMAN-DEWI-2020.pdf.
- Nusantara, A. D., Bertham, Y. H. dan Mansur, I. (2012) Bekerja dengan Fungi Mikoriza Arbuskula. 1 ed. Diedit oleh N. Januarini. Bogor: SEAMEO BIOTROP.
- ³ Pane, R. D. P., Ginting, E. N. dan Hidayat, F. (2022) "Mikroba Pelarut Fosfat dan Potensinya dalam Meningkatkan Pertumbuhan Tanaman," Warta PPKS, 27(1), hal. 51–59.
- Patel S, Prajapati V, Patel P. (2022). Isolation and Screening of Mineeal Phosphate Solubulizing Microorganisms. p. 187-192. In Practical Handbook on Agricultural Microbiology. Natarajan Amaresan, Pritesh

- Patel, Dhruti Amin (Eds.). Springer Protocol Handbooks. Humana Press. New York, U.S.A.
- Paulina, M. dan Lumbantoruan, S. M. (2022) ³ “Respon Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung Manis (*Zea mays* L. *Saccharata*) Terhadap Biochar dan Fungi Mikoriza Arbuskula di Lahan Pesisir,” *Jurnal Pertanian Agros*, 24(1), hal. 193–201. Tersedia pada: <http://e-journal.janabadra.ac.id/index.php/JA/article/view/1534>.
- Paulina, M., Mansur, I. dan Junaedi, A. (2018) “Tanggap Pertumbuhan Aren (*Arenga Pinnata* (Wurmb) Merr.) Diinokulasi dengan Fungi Mikoriza Arbuskula terhadap Pengapuran di Lahan Pasca Tambang Batubara,” *Jurnal Silvikultur Tropika*, 9(3), hal. 196–204. doi: 10.29244/j-siltrop.9.3.196-204.
- Paulina, M., Mansur, I. dan Junaedi, A. (2020) “Evaluasi Pertumbuhan Bibit Aren (*Arenga pinnata* (Wurmb) Merr.) terhadap Pemupukan P dan Inokulasi Fungi Mikoriza Arbuskula,” *Jurnal Sains STIPER Amuntai*, 2(10), hal. 74–86.
- Perez, E., Sulbaran, M., Ball, M. M., & Yarzabal, L. A. (2007). Isolation and characterization of mineral phosphate-solubilizing bacteria naturally colonizing a limonitic crust in the south-eastern Venezuelan region. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(11), 2905-2914.
- Piddington, C. S., Houston, C. S., Paloheimo, M., Cantrell, M., Miettinen-Oinonen, A., Nevalainen, H., & Rambosek, J. (1993). The cloning and sequencing of the genes encoding phytase (phy) and pH 2.5-optimum acid phosphatase (aph) from *Aspergillus niger* var. *awamori*. *Gene*, 133(1), 55-62.
- Pikovskaya RI. (1948). Mobilization of phosphorus in soil in connection with the vital activity of some microbial species. *Mikrobiologiya*. 17: 362–370.
- Pradhan, A., Pahari, A., Mohapatra, S., & Mishra, B. B. (2017). Phosphate-solubilizing microorganisms in sustainable agriculture: genetic mechanism and application. *Advances in Soil Microbiology: Recent Trends and Future Prospects: Volume 2: Soil-Microbe-Plant Interaction*, 81-97.
- Pramesti, A.D. and Hermiyanto, B. (2019) ‘Pengaruh Pemupukan Kompos Blotong Dan Pupuk Organik Cair Eceng Gondok Terhadap Infeksi Endomikoriza Dan Produksi Tanaman Sorgum (*Sorghum bicolor* (L.)

- Moench) Pada Lahan Pasir Pantai Paseban Kabupaten Jember', Berkala Ilmiah Pertanian, 2(3), p. 108. doi:10.19184/bip.v2i3.16283.
- ² Premono, E.M., Widyastuti, R., dan Anas, I. (1992). "Pengaruh bakteri pelarut P terhadap serapan kation unsur mikro tanaman jagung pada tanah masam," Makalah PIT Perm. 31 Juli-1 agustus 1992. Bandung.
- Premono, M.E. dan R. Widyastuti. (1994). "Stabilitas *Pseudomonas putida* dalam medium pembawa dan potensinya sebagai pupuk hayati," Hayati, 1(2), hal. 55-58.
- Prihastuti (2016). Prospek Komersialisasi Produk Mikroba di Bidang Pertanian. Prospek Komersialisasi Produk Mikroba (159-167) El-Hayah Vol. 5, No.4 Maret 2016
- Prihastuti dan A. Harsono. (2012). Kemunduran kualitas pupuk hayati *Rhizobium*. J. Sains and Mat. (1): 1-5.
- Prihastuti. (2008). Adopsi pupuk hayati di Indonesia: Antara Harapan dan Realita. Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian, Surakarta 7 Agustus 2008, Kerjasama Balai Penelitian Tanaman Kacang-Kacangan dan Umbi-Umbian dengan Fakultas Pertanian/Pascasarjana Agronomi Universitas Sebelas Maret Surakarta dan Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Jawa Tengah. Hal: 76-81.
- Rachmat, S.S. and Shovitri, M. (2021) 'Studi Literatur Tentang Teknik Liofilisasi untuk Preservasi Bakteri', Jurnal Teknik ITS, 10(2), pp. 17–22.
- ³ 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), hal. 317-324.
- Ramachandran, S., Fontanille, P., Pandey, A., & Larroche, C. (2006). Gluconic acid: properties, applications and microbial production. Food Technology & Biotechnology, 44(2).
- Ramamoorthy, P. et al. (2020) 'Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Agriculture', Agri Mirror: Future India, 1. Available at: www.aiasa.org.in.

- Ramesh, M., & Reddy, P. N. (2017). Acid phosphatase: a general overview and future perspectives. *Journal of Plant Interactions*, 12(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/17429145.2017.1291356>
- Rasyidah, R. and Fariani, R. (2021) 'Perbandingan Teknik Penyimpanan Menggunakan Medium Yang Berbeda Terhadap Viabilitas Kapang *Colletotrichum capsici* dan *Prycularia oryzae*', *Jurnal Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*, 3(2), pp. 69–76. doi:10.14710/jplp.3.2.69-76.
- Richardson, A. E. and Simpson, R. J. (2011) "Soil microorganisms mediating phosphorus availability," *Plant Physiology*, 156(3), pp. 989–996. doi: 10.1104/PP.111.175448.
- Richardson, A. E., Hadobas, P. A., & Hayes, J. E. (2001). Extracellular secretion of *Aspergillus* phytase from *Arabidopsis* roots enables plants to obtain phosphorus from phytate. *The Plant Journal*, 25(6), 641-649.
- Rodríguez H, Rico A, Sampedro I, García-Salamanca A, Flores R, Carro L, Bonilla I, García-Romera I, Martínez-Molina E. 2006. The *phoC* gene encodes a novel acid phosphatase in *Rhizobium etli* CNPAF512. *FEMS Microbiol Lett* 254:297-303. doi: 10.1111/j.1574-6968.2005.00012.x.
- 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, 15-21.
- Rodríguez, H., Rossolini, G. M., Gonzalez, T., Li, J., & Glick, B. R. (2000). Isolation of a gene from *Burkholderia cepacia* IS-16 encoding a protein that facilitates phosphatase activity. *Current microbiology*, 40, 362-366.
- Rodríguez, H., & Fraga, R. (1999). Phosphate solubilizing bacteria and their role in plant growth promotion. *Biotechnology advances*, 17(4-5), 319-339.
- Ruginescu, R. et al. (2020) 'Bioprospecting for novel halophilic and halotolerant sources of hydrolytic enzymes in brackish, saline and hypersaline lakes of romania', *Microorganisms*, 8(12), pp. 1–16. Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms8121903>.
- Saadouli, I. et al. (2021) 'The impact of the inoculation of phosphate-solubilizing bacteria *pantoea agglomerans* on phosphorus availability and bacterial community dynamics of a semi-arid soil', *Microorganisms*, 9(8). Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms9081661>.

- Sagala, D. et al. (2022) Pengantar Nutrisi Tanaman. 1 ed, Yayasan Kita Menulis. 1 ed. Diedit oleh R. Watianthos.
- Sane SA, Mehta SK. (2015). Isolation and evaluation of rock phosphate solubilizing fungi as potential bio-fertilizer. *J. Fertil. Pestic.* 6: 156.
- Santos, S. A., Jorge, J. A., Terenzi, H. F., & Rechia, C. G. V. (2017). Cloning, sequence analysis and expression of an acid phosphatase gene from *Penicillium funiculosum*. *Journal of Basic Microbiology*, 57(5), 346-355. <https://doi.org/10.1002/jobm.201600608>
- Sapareng, S. and Amir, M. (2022) 'Dekomposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Cendawan Pelapuk', *Jurnal Tabaro*, 6(1), pp. 718–726.
- Sari, R. dan Prayudyarningsih, R. (2015) "Rhizobium : Pemanfaatannya sebagai Bakteri Penambat Nitrogen," *Info Teknis EBONI*, 12(1), hal. 51–64. Tersedia pada: <https://media.neliti.com/media/publications/491847-none-fdf4c732.pdf>.
- Sari, V. K. et al. (2023) 'Pengembangan Pertanian Terpadu di Desa Slateng Kecamatan Ledokombo Kabupaten Jember melalui Pengkayaan Pupuk Organik dengan Mikroba Fungsional', *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 6(1).
- Sashidhar, B., & Podile, A. R. (2010). Mineral phosphate solubilization by rhizosphere bacteria and scope for manipulation of the direct oxidation pathway involving glucose dehydrogenase. *Journal of applied microbiology*, 109(1), 1-12.
- ³ Satyaprakash, M., Nikitha, T., Sadhana, B., Reddi, E.U. B., dan 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), hal. 2133-2144.
- Schmid, A. K., Reiss, D. J., Kaur, A., Subramanian, S., & Greenberg, E. P. (2016). An investigation of the presence and role of acid phosphatases in *Bacillus subtilis*. *Journal of Bacteriology*, 198(3), 448-463. <https://doi.org/10.1128/JB.00622-15>
- Seeling, B. and Zasoski, R. J. (1993) "Microbial effects in maintaining organic and inorganic solution phosphorus concentrations in a grassland topsoil," *Plant and Soil*, 148(2), pp. 277–284. doi: 10.1007/BF00012865.

- Selvi KB, Paul JJA, Vijaya V, Saraswathi K. (2017). Analyzing the efficacy of phosphatesolubilizing microorganisms by enrichment culture techniques. *Biochem. Mol. Biol. J.* 3:1
- Setiawati, T. C., Basuki and Sulistyawati, N. (2019) 'Pengamatan Kesuburan Tanah, Pemanfaatan Organisme Tanah Untuk Pengendali Hama Uret Serta Perbaikan Manajemen Laboratorium Berbasis ISO 17025', *Jurnal Pengabdian Masyarakat IPTEKS*, 5(2), pp. 176–181.
- Shabrina N. (2011) "Teknologi formulasi inokulan rizobakteria pemacu tumbuh dan aplikasinya pada tanaman kedelai [tesis]." Bogor, Indonesia: Institut Pertanian Bogor.
- Sharma SB, Sayyed RZ, Trivedi MH, Gobi TA. (2013). Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils. *Springer Plus.* 2:587.
- Sharma, S. B. et al. (2013) "Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils," *SpringerPlus*, 2(1). doi: 10.1186/2193-1801-2-587.
- Sharma, S. B., Sayyed, R. Z., Trivedi, M. H., dan Gobi, T. A. (2013). "Phosphate solubilizing microbes: Sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils," *Springer Plus*, 2 (1), hal.1-14.
- Sharma, S.B. et al. (2013) 'Phosphate solubilizing microbes: sustainable approach for managing phosphorus deficiency in agricultural soils', *SpringerPlus*, 2(1), p. 587. Available at: <https://doi.org/10.1186/2193-1801-2-587>.
- Silalahi, M. (2010). Pengaruh Modifikasi Media Murashige-Skoog (MS) dan Zat Pengatur Tumbuh BAP terhadap Pertumbuhan Kalus *Centella asiatica* L.(Urban.) Pengaruh Modifikasi Media Murashige-Skoog (MS) dan Zat Pengatur Tumbuh BAP terhadap Pertumbuhan Kalus *Centella asiatica* L.(Urban.). *Prolife* 2(1):11-17.
- Silva da, A.V. et al. (2022) 'Phosphate solubilization by Antarctic yeasts isolated from lichens', *Archives of Microbiology*, 204(12), pp. 0–13. doi:10.1007/s00203-022-03310-0.
- Simanungkalit, R.D.M., Suriadikarta, D.A., Saraswati, R., Setyorini, D., & Hartatik, W. (2006) "Pupuk Organik dan Hayati," Bogor, Indonesia:

- Balai Besar Litbang Sumberdaya Lahan Pertanian, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian.
- Smith, S. E. dan Read, D. (2008) *Mycorrhizal Symbiosis*. 3 ed, Soil Science. 3 ed. USA: Academic Press. doi: 10.1097/00010694-198403000-00011.
- Soetriono, S. et al. (2023) 'The effectiveness of giving organic matter to the productivity of tomato plants The Effectiveness Of Giving Organic Matter To The Productivity Of Tomato Plants', AIP Conference Proceedings, 020014(January), pp. 020014-1-020014-6.
- Sondang, Y., Anty, K. and Siregar, R. (2020) 'Pengaruh Media Pembawa Pupuk Hayati Bakteri Pelarut Fosfat terhadap Keberadaan Bakteri Endogen dan Bakteri Rhizosfer Tanaman Jagung', Prosiding Webinar Nasional Series Politeknik Negeri Payakumbuh, pp. 182–192.
- Sosena, A. and Sheleme, B. (2020) 'Effects of lime and phosphorous application on chemical properties of soil, dry matter yield, and phosphorus concentration of barley (*Hordeum vulgare*) grown on Nitosols of Emdibir, Southern Ethiopia', *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 11(4), pp. 131–141. Available at: <https://doi.org/10.5897/JSSEM2020.0837>.
- Soumare, A. et al. (2020) 'From Isolation of Phosphate Solubilizing Microbes to Their Formulation and Use as Biofertilizers: Status and Needs', *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*. Frontiers Media S.A. Available at: <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00425>.
- Soumare, A., Boubekri, K., Lyamlouli, K., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., & Kouisni, L. (2020) "From isolation of phosphate solubilizing microbes to their formulation and use as biofertilizers: status and needs," *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 425.
- Spohn, M. and Widdig, M. (2017) "Turnover of carbon and phosphorus in the microbial biomass depending on phosphorus availability," *Soil Biology and Biochemistry*, 113, pp. 53–59. doi: 10.1016/J.SOILBIO.2017.05.017.
- Sriwahyuni, P., & Parmila, P. (2019) "Peran bioteknologi dalam pembuatan pupuk hayati," *Agro Bali: Agricultural Journal*, 2(1), pp. 46-57.
- Subba-Rao NS. (1981). *Biofertilizers in Agriculture*. Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi, Bombay.

- 4
Subba-Rao NS. (1982). Phosphate solubilization by Soil Microorganisms. p. 295-303. In Subba-Rao NS (Ed.) *Advances in Agricultural Microbiology*. Oxford & IBH Publishing Co. New Delhi, Bombay, Calcutta.
- Subhan, N. N. (2004) 'Penggunaan Pupuk Fosfat, Kalium dan Magnesium pada Tanaman Bawang Putih Dataran Tinggi', *Jurnal Ilmu Pertanian*, 11(2), pp. 56–67.
- Sudewi, S. et al. (2020) 'Isolation of phosphate solubilizing bacteria from the rhizosphere of local aromatic rice in Bada Valley Central Sulawesi, Indonesia', *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 575(1). doi:10.1088/1755-1315/575/1/012017.
- Sugianto, S.K., Shovitri, M. and Hidayat, H. (2019) 'Potensi Rhizobakteri Sebagai Pelarut Fosfat', *Jurnal Sains dan Seni ITS*, 7(2), pp. 7–10. doi:10.12962/j23373520.v7i2.37241.
- Sugito, T. et al. (2010) "Soil microbial biomass phosphorus as an indicator of phosphorus availability in a Gleyic Andosol," *Soil Science and Plant Nutrition*, 56(3), pp. 390–398. doi: 10.1111/J.1747-0765.2010.00483.X.
- Sukmadewi, D. K. T., Anas, I., Widyastuti, R., & Citraresmini, A. (2019) "Peningkatan Kemampuan Mikroba Pelarut Fosfat dan Kalium Melalui Teknik Mutasi Iradiasi Gamma," *Jurnal Ilmiah Aplikasi Isotop dan Radiasi*, 15(2), pp. 67-75.
- Sulaeman, Suparto, Eviati. (2005). *Petunjuk Teknis: Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air dan Pupuk*. Balai Penelitian Tanah. Bogor.
- Suryantini, S. (2016) "Formulasi bahan pembawa pupuk hayati pelarut fosfat untuk kedelai di tanah masam," *Buletin Palawija*, 14(1), pp. 28-35.
- Sutarman (2016) *Biofertilizer Fungi Trichoderma & Mikoriza*. 1 ed. Sidoarjo: UMSIDA PRESS.
- Swandi, M. K., Mubarik, N. R., & Tjahjoleksono, A. (2019) "Rhizobacterial inoculants: the formulation as biofertilizer and its application on chili plants (*Capsicum annum* L.)," *Malaysian Journal of Microbiology*, 15(1), pp. 44-51.
- Tan, K. H. (1995). *Dasar-dasar kimia tanah*. UGM Press. Yogyakarta.
- Thakur, D., Kaushal, R. and Shyam, V. (2014) 'Phosphate solubilising microorganisms: role in phosphorus nutrition of crop plants-A review',

- Agricultural Reviews, 35(3), p. 159. Available at: <https://doi.org/10.5958/0976-0741.2014.00903.9>.
- Timofeeva, A., Galyamova, M. and Sedykh, S. (2022) "Prospects for Using Phosphate-Solubilizing Microorganisms as Natural Fertilizers in Agriculture," *Plants* 2022, Vol. 11, Page 2119, 11(16), p. 2119. doi: 10.3390/PLANTS11162119.
- Timofeeva, A.M., Galyamova, M.R. and Sedykh, S.E. (2022) 'Bacterial Siderophores: Classification, Biosynthesis, Perspectives of Use in Agriculture', *Plants*, 11(22), p. 3065. doi:10.3390/plants11223065.
- 3 Tisdale, S., Nelson, W. dan Beaton, J. (1990) *Soil Fertility and Fertilizers*. 4 ed. New York: Macmillan Publishing Co.
- Triana, Q., Wibowo, R. H., Sipriyadi, Darwis, W, dan Nusantara, A.D. (2019). "Isolation of phosphate solubilizing bacteria from red chili (*Capcism annum* L.) plantation soil in Rejang Lebong District," *Prosiding Seminar dan Rapat Tahunan BKS PTN Wilayah Barat Bidang MIPA*, hal.712-719.
- Tuheteru, F. D. et al. (2015) *Pupuk Hayati Mikoriza untuk Budidaya dan Rehabilitasi Wilayah Pantai*. 2 ed. Bogor: SEAMEO BIOTROP.
- Valverde, A., A. Burgos, T. Fiscella, R. Rivas, E. Velazquez, C. Rodriguez-Barrueco, E.Cervantes, M. Chamber, J.M. Igual. (2006). Differential effects of co inoculations with *Pseudomonas jessenii* PS06 (a phosphate solubilizing bacterium) and *Mesorhizobium ciceri* c-2/2 strains on the growth and seed yield of chickpea under greenhouse and field conditions. *Plant Soil* 287:43-50
- Veerapagu, M., Jeya, K. R., & Sankaranarayanan, A. (2022) "Screening of Endophytes for Antibacterial Properties. In *Endophytic Microbes: Isolation, Identification, and Bioactive Potentials*," New York, NY: Springer US.
- Venkateswarlu B, Rao AV, Raina P. (1984) Evaluation of phosphorus solubilization by microorganisms isolated from aridisols. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 32: 273–277. Wagner HG, Wolf DC. 1998. Carbon transformation and soil organic matter formation. p. 218-257. In Silvia DM, Fuhrmann JJ, Hartel PG, Zuberer DA (Eds.) *Principles and Applications of Soil Microbiology*. Prentice Hall. New Yersey.

- Vera-Morales, M. et al. (2023) 'Nematophagous Fungi: A Review of Their Phosphorus Solubilization Potential', *Microorganisms*. MDPI. Available at: <https://doi.org/10.3390/microorganisms11010137>.
- 5 Waksman, S.A. and R.L. Starkey. (1981). "The Soil and The Microbe," John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Walpol BC, Yoon M. (2012). Prospectus of phosphate solubilizing microorganisms and phosphorus availability in agricultural soils: A Review. *African J. Microbiol. Res.* 6:6600-6605.
- Wang, Y., Xu, L., Liao, C., & Zhou, N. (2015). Diversity and distribution of acid phosphatase coding genes in soils and sediments of marine and freshwater systems. *Applied and Environmental Microbiology*, 81(24), 8089-8097
- Wang, Z., Geng, Y. and Liang, T. (2020) 'Optimization of reduced chemical fertilizer use in tea gardens based on the assessment of related environmental and economic benefits', *Science of The Total Environment*, 713, p. 136439. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136439>.
- Widawati, S. dan Suliasih, S. (2006) "Populasi Bakteri Pelarut Fosfat (BPF) di Cikaniki, Gunung Botol, dan Ciptarasa, serta Kemampuannya Melarutkan P Terikat di Media Pikovskaya Padat," *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 7(2), hal. 109–113. doi: 10.13057/biodiv/d070203.
- Widawati, S. dan Suliasih. (2006). "Augmentasi bakteri pelarut fosfat (BPF) potensial sebagai pemacu pertumbuhan caysin (*Brasica caventis* Oed.) di tanah marginal," *Biodiversitas*, 7(1), hal. 10-14.
- Widyati, E. (2013) "Memahami interaksi tanaman–mikroba," *Tekno Hutan Tanaman*, 6(1), pp. 13-20.
- Yan Riska Venata Sembiring, Priyo Adi Nugroho, dan Istianto. (2013) Kajian Penggunaan Mikroorganisme Tanah untuk Meningkatkan Efisiensi Pemuoukan pada Tanaman Karet. *Warta Perkaretan*, 32(1), 7 - 15
- Yang, G. et al. (2018) 'How Soil Biota Drive Ecosystem Stability', *Trends in Plant Science*, 23(12), pp. 1057–1067. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.09.007>.

- Yulensri, Y., Anidarvi, A., & Sembiring, N. M. (2021) "Produksi serta aplikasi pupuk hayati cair (PHC) untuk meningkatkan produksi padi sawah di kelompok tani Inayah Kenagarian Taram," Prosiding Seminar Nasional Pengabdian Kepada Masyarakat, 1(1), pp. 49-58.
- Zaman, N. et al. (2021) Inovasi Produk Pertanian. Edited by J. Simarmata. Medan: Yayasan Kita Menulis.
- Zhang, T., Hu, F. and Ma, L. (2019) 'Phosphate-solubilizing bacteria from safflower rhizosphere and their effect on seedling growth', Open Life Sciences, 14(1), pp. 246–254. doi:10.1515/biol-2019-0028.
- Zhu, F. et al. (2011) "Isolation and characterization of a phosphate-solubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao saltern on the coast of yellow sea of China," Evidence-based Complementary and Alternative Medicine, 2011. doi: 10.1155/2011/615032.
- Zhu, F., Qu, L., Hong, X., & Sun, X. (2011). "Isolation and characterization of a phosphatesolubilizing halophilic bacterium *Kushneria* sp. YCWA18 from Daqiao saltern on the coast of yellow sea of China," Hindawi Publishing Corporation, hal. 1-6.

Biodata Penulis



Muhammad Asril lahir di Aceh Utara, pada 14 Februari 1990. Ia tercatat sebagai lulusan Sarjana Biologi Universitas Sumatera Utara dan Magister Mikrobiologi Institut Pertanian Bogor. Saat ini penulis bekerja sebagai Dosen Biologi, Divisi Mikrobiologi di Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung dengan alamat koresponden m.asril@bi.itera.ac.id. Selain itu, Sejak tahun 2020, penulis juga sedang menempuh pendidikan Doktor di Program Studi Mikrobiologi, IPB University. Ia aktif

melakukan penelitian terkait biokontrol penyakit tanaman seperti *Fusarium oxysporum* pada benih cabai merah dan penyakit hawar daun pada pembibitan kelapa sawit menggunakan agen bakteri kitinolitik sebagai kandidat formulasi biopestisida bakteri serta potensi bakteri Plant Growth Promoting Bacteria dari tanah asam. Selain itu, penulis juga fokus pada pengembangan formulasi biofertilizer dari bakteri asal limbah cair tahu yang diberi nama "Proteolizer – Chili Booster". Buku ini merupakan buku ke-12 yang ditulis oleh penulis, setelah sebelumnya menulis buku Penyakit Tanaman & Pengendaliannya, Teknologi Produksi Benih, Inovasi Produk Pertanian, Mikrobiologi Dasar, Keanekaragaman Hayati, Pengantar Perlindungan Tanaman, Pengawasan Mutu dan Teknologi Hasil Ternak, Ilmu Tanah, Pengelolaan Hama Terpadu, Kesuburan dan Pemupukan Tanah, Teknologi dan Produksi Benih.



Widya Lestari, S. Si., M.Si Lahir di Porsea 16 juni 1988. Tamat dari SD Yayasan Bonapasogit pada tahun 2000. Tamat dari sekolah SLTP PGRI 3 Medan Tahun 2003, melanjutkan sekolah Di SMA Negeri 3 Medan dan tamat pada Tahun 2003. Meraih gelar strata 1 (S1) Fakultas MIPA (Biologi) dari Universitas Sumatera Utara tahun (2006-2011). Memperoleh Beasiswa Unggulan Dikti pada Program Magister (S2) Biologi FMIPA USU tahun

2011-2013. Sejak tahun 2014 sampai sekarang menjadi Dosen Tetap di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Labuhanbatu. Hibah Penelitian Dosen Pemula yang telah diperoleh dari DIKTI pada Tahun 2016 dan 2017. Memperoleh Sertifikasi Pendidik pada Tahun 2018. Mengikuti Kegiatan Magang Dosen di Perguruan Tinggi IPB University (MDPT) pada Tahun 2022. Mengajar Mata Kuliah Mikrobiologi, Biokimia dan Biologi. Telah menulis dua buku yang berjudul Potensi Bakteri Endofit Dari Tumbuhan *Vaccinium varingaefolium*, Pengantar Bioteknologi tahun 2021 dan Virologi pada tahun 2022.



Basuki lahir di Sukoharjo, pada tanggal 02 Agustus 1985. Lulus S1 dari Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Sebelas Maret Surakarta tahun 2009, dan Lulus S2 tahun 2014 dari Program Studi Ilmu Tanah Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada melalui program Beasiswa Unggulan. Karier tahun 2009-2019 menjadi staf peneliti di Pusat Penelitian Tebu PT Perkebunan Nusantara XI (Persero) dengan membidangi Bagian Sistem Informasi Geografis, Kesuburan Tanah & Rekomendasi Pemupukan Tanah, Biologi Tanah, Kultur Jaringan, Agen Hayati Pengendali Hama Dan

Penyakit Tanaman Tebu, Pemuliaan Tanaman Tebu, Percobaan Lapang. Tahun 2012 melepas varietas tebu unggul baru di Indonesia dengan nomor ID 2794/kpts/SR.120/8/2012. Pada 2019 – Sekarang, penulis menjadi staf dosen di Program Studi Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian, Universitas Jember. Keahlian yang ditekuninya meliputi Evaluasi Sumberdaya Lahan, Sistem Informasi Geografis, Pertanian Presisi, Genesis Tanah, Morfologi&klasifikasi tanah, Kesuburan Tanah, Penilaian lapang karakteristik tanah, Sistem Pertanian Berkelanjutan, dan Rekomendasi Pemupukan. Penulis juga telah menulis beberapa buku diantaranya dengan judul Ilmu Tanah dan Nutrisi tanaman (ISBN 978-623-5488-00-4); BUDIDAYA PADI Integrasi Pertanian dan Peternakan Mendukung Produktifitas Padi (ISBN 978-623-6916-84-1), Hidrologi Pertanian (ISBN 978-623-342-646-6), Pengantar Teknologi Pertanian (ISBN 978-623-8070-88-6), Pengantar Agroklimatologi (ISBN 978-623-8070-61-9), Kesuburan dan Pemupukan Tanah (ISBN 978-623-342-696-1), Pertanian Berkelanjutan (ISBN 978-623-342-748-7).



Muhammad Fahyu Sanjaya lahir pada 7 April 1994 di Kota Kendari, Provinsi Sulawesi Tenggara, Indonesia. Saat ini ia sedang aktif sebagai dosen di program studi Agroekoteknologi Fakultas Pertanian dan Kehutanan Universitas Sulawesi Barat. Pria yang kerap disapa Fahyu ini adalah anak kedua dari tiga bersaudara yang lahir dari pasangan Alm. L.M. Djamar (Ayah) dan Sitti Hapsah (Ibu). Beliau menamatkan sekolah program sarjana (S1) di Program Studi Agroteknologi Fakultas Pertanian Universitas Halu Oleo dan lulus pada tahun 2016, kemudian pada tahun 2017 melanjutkan sekolah di program pascasarjana (S2) program studi Agronomi universitas Halu Oleo dan lulus pada tahun 2020. Selama masa kuliah beliau dikenal aktif dalam berbagai riset dibidang pertanian, dan menjadi asissten Dosen di Laboratorium Pertanian Unit Biodiversitas Tanah. Beliau juga telah beberapa kali bertugas sebagai seorang tenaga pengajar, yaitu pernah menjadi Dosen di Universitas Amal ilmiah Yapis Wamena, Provinsi Papua pada tahun 2021. Selain itu beliau juga pernah menjadi tim ahli tanah dalam pembuatan surat izin kegiatan dalam aspek lingkungan pada tahun 2017. Selama menjadi akademisi fokus penelitian beliau adalah tentang biodiversitas tanah yaitu bagaimana meningkatkan ketersediaan unsur hara pada media tanam dengan memanfaatkan organisme tanah. Beberapa artikel mengenai bidang beliau telah dipublikasi pada berbagai jurnal bereputasi.



Refa Firgiyanto S.P., M.Si. Penulis dilahirkan di Banyumas, Jawa Tengah pada tanggal 26 Maret 1990. Pendidikan sarjana sejak tahun 2008 ditempuh di Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Jenderal Soedirman Purwokerto dan pendidikan master di Program Studi Agronomi dan Hortikultura, Sekolah Pascasarjana, Institut pertanian Bogor melalui program Beasiswa Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN) pada tahun 2013. Selepas kuliah, penulis mengabdikan diri di Politeknik Pertanian dan Peternakan Tuban pada tahun 2015, kemudian melanjutkan pengabdian di Politeknik Negeri Jember sejak 2018 dan mengajar pada bidang kajian produksi tanaman hortikultura.

Baso Manguntungi lahir di Maros pada tanggal 15 Agustus 1989. Penulis saat ini tercatat sebagai dosen di Program Studi Pendidikan Biologi FKIP Universitas Sulawesi Barat. Penulis menempuh pendidikan sarjana pada jurusan Biologi Universitas Negeri Makassar (2007-2011) dan Magister pada program studi Biologi Tumbuhan IPB University (2012-2014). Penulis aktif dalam publikasi ilmiah dengan tautan: https://scholar.google.com/citations?hl=id&user=yc9Y3ksAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate.



Dr. Sri Sudewi., SP.,M.Sc. Lahir di Sinjai (Sulawesi Selatan). Dari Ayah bernama Rustan Rahman, SH, MH (alm) dan ibu Hasnita, S.Pd. Menyelesaikan pendidikan SD, SMP dan SMA di Palu. Istri dari Dr. Abdul Rahim Saleh, SP.,M.Sc ini telah dikaruniai sepasang putra putri. Pendidikan S1 diselesaikan di Fakultas Pertanian Universitas Tadulako Palu pada tahun 2005. Pendidikan Magister (S2) di tempuh di Fakultas Pertanian Universitas Gadjah Mada Yogyakarta tahun 2010. Tahun 2020 menyelesaikan pendidikan Doktor (S3) Ilmu Pertanian Universitas Hasanuddin Makassar. Sejak tahun 2012, diangkat menjadi Dosen Tetap di Fakultas Pertanian Universitas Alkhairaat Palu, kini berbagai artikel ilmiah telah dipublikasikan pada beberapa jurnal internasional bereputasi dan jurnal nasional terakreditasi. Penulis juga aktif sebagai editor dan reviewer pada berbagai jurnal nasional dan internasional terakreditasi. Menulis beberapa buku dengan judul: “Manfaat Bekatul dalam Mengendalikan Gulma pada Tanaman Padi” (2021), book chapter referensi berjudul: Pupuk Organik, Bioteknologi, Dasar Ilmu Pertanian (2022), buku referensi dengan judul “Hidroponik (Inovasi Cerdas Lahan Terbatas)” ditahun yang sama. Tahun 2023 menulis buku referensi yang berjudul “Pertanian Berkelanjutan serta Teknologi Budidaya Tanaman Hortikultura”.



Monica Kharisma Swandi lahir di Padang, 05 Juni 1993. Pada tahun 2014, penulis mendapatkan gelar Sarjana Sains dari Jurusan Biologi FMIPA Universitas Andalas (UNAND). Penulis melanjutkan studi S2 di Jurusan Mikrobiologi IPB University dan mendapatkan gelar Magister Sains pada tahun 2017. Penulis berprofesi sebagai dosen tetap pada Program Studi Biologi Fakultas Pertanian, Perikanan dan Biologi Universitas Bangka Belitung (UBB) sejak tahun 2019. Saat ini penulis sedang mengemban amanah sebagai Kepala Laboratorium Biologi UBB. Penelitian yang pernah dilakukan penulis dengan judul “Formulasi Inokulan Rizobakteria Penambat Nitrogen dan Pelarut Fosfat sebagai Pupuk Hayati pada Tanaman Cabai” dan mendapatkan paten sederhana pada tahun 2021 dengan nomor paten: IDP000074871 dan judul “Formula Konsorsium Bakteri pada Pupuk Hayati dan Biokontrol Tanaman Hortikultura serta Proses Pembuatannya”.



Maria Paulina lahir di Manna, pada 13 Maret 1991. Ia tercatat sebagai lulusan program Sarjana di Universitas Bengkulu dan Program Magister di Institut Pertanian Bogor. Wanita yang kerap disapa Ria merupakan dosen tetap pada Universitas Bina Insan Lubuklinggau dan aktif melakukan kegiatan Tri Dharma. Pada tahun 2021, ia berhasil mendapatkan Hibah Penelitian Dosen Pemula (PDP) dari Kementerian Riset dan Teknologi / Badan Riset dan Inovasi Nasional dengan judul “Respon Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Jagung Manis (*Zea mays* L. *Saccharata*) Terhadap Biochar dan Fungi Mikoriza Arbuskula di Lahan Pesisir.

Wiwin Rewini Kunusa lahir di Gorontalo, pada 8 November 1970. Ia tercatat sebagai lulusan Universitas Negeri Gorontalo SI Jurusan Kimia dan S2 di Universitas Brawijaya, Malang Jawa Timur. Wanita yang kerap disapa Wiwin ini adalah anak dari pasangan Hasan Kunusa/alm (ayah) dan Haina H. Kunusa/alm (ibu). Wiwin Rewini Kunusa telah banyak menghasilkan jurnal-jurnal penelitian dan pengabdian pada masyarakat serta banyak membimbing

mahasiswa dalam PKM baik melalui pendanaan DIKTI, PNPB Universitas ataupun Fakultas. Dan juga sebagai Dosen Pembimbing lapangan pada Program MBKM. Ditahun 2021 sebagai reviewer tingkat nasional proposal PKM Mahasiswa tingkat MIPA - LPTK. Pada 2022, Wiwin berhasil meraih penghargaan Dosen Favorit dalam Program DIKTI yakni Abdidaya 2022 dalam kategori pemilihan dosen pembimbing lapangan pada Program PHP2D

Mikroorganisme Pelarut Fosfat pada Pertanian Berkelanjutan

ORIGINALITY REPORT

10%
SIMILARITY INDEX

10%
INTERNET SOURCES

2%
PUBLICATIONS

1%
STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	kitamenulis.id	2%
Internet Source		

2	docplayer.info	2%
Internet Source		

3	www.researchgate.net	1%
Internet Source		

4	idoc.pub	1%
Internet Source		

5	repository.pertanian.go.id	1%
Internet Source		

6	id.scribd.com	1%
Internet Source		

7	eprints.umm.ac.id	1%
Internet Source		

8	press.unisri.ac.id	1%
Internet Source		

Exclude quotes On

Exclude matches < 1%

Exclude bibliography On