

I. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Andisol

Andisol ialah tanah yang terbentuk dari bahan vulkanik yang berasal dari aktivitas vulkanik, selain itu Andisol juga memiliki bahan andik dengan ketebalan sebesar 60% atau lebih. Andisol merupakan tanah gembur, ringan dan porous, tanah bagian atasnya berwarna hitam atau gelap, bertekstur sedang (lempung, berdebu), terasa licin seperti sabun apabila diraba. Menurut taksonomi tanah, Andisol merupakan tanah yang bersifat andik yaitu dengan kadar bahan organik kurang dari 25%. Beberapa permasalahan pada Andisol yaitu tingginya kapasitas jerapan P, bahkan melebihi jerapan P oksida hidrat Al dan Fe, hal ini disebabkan karena bahan amorf mempunyai permukaan spesifik yang begitu luas, sehingga jerapan P lebih tinggi (Soil Survey Staff, 2010).

Penyebaran Andisol dominan di wilayah dekat dengan pusat-pusat erupsi gunung api. Jenis tanah banyak tersebar di Chile, Peru, Ecuador, Colombia, Amerika Tengah, USA, Kamchatka, Jepang, Filipina, Indonesia, New Zealand, dan Negara bagian kepulauan Selatan-Barat Pasifik. Di Indonesia, luas penyebaran Andisol 3,4 % luas daratan Indonesia yang diperkirakan seluas 6.491.000 ha. Andisol paling banyak tersebar di Sumatera utara dengan luas area 1.875.000 ha, Jawa Timur 0,73 juta ha, Jawa Barat 0,50 juta ha, Jawa Tengah 0,45 juta ha, dan Maluku 0,32 juta ha (Munir *et al.*, 1996)

Sifat yang tidak baik pada Andisol adalah memiliki retensi fosfat >85 %. Retensi fosfat pada Andisol menyebabkan P yang tidak tersedia bagi tanah sehingga perlu aplikasi pemupukan. Fosfor dalam Andisol sangat kuat terikat oleh Al dan Fe dari mineral nonkristalin. Debu vulkanik yang masih baru, mengandung fosfor yang mudah larut dalam larutan asam. Tanaman dapat menyerap fosfor yang larut dan dengan mudah. Aplikasi fosfor dapat bereaksi dengan debu vulkanik seperti Al dan Fe dari mineral nonkristalin sehingga menghasilkan ikatan metal fosfor yang tidak mudah larut (Tan, 1998).

Unsur hara P yang dijerap oleh Al maupun Fe pada Andisol menjadi tidak tersedia bagi tanaman, sehingga hal ini akan menghambat pertumbuhan. Reaksi tanah sedikit masam hingga netral, kapasitas tukar kation bernilai tinggi, mempunyai kemampuan menjerap fosfat sangat kuat, akan tetapi berbobot isi

rendah yaitu kurang dari 0.85 g/cm^3 . Tingginya kemampuan Andisol menyerap fosfat yang dihubungkan dengan reaktivitas fiksasi yang tinggi dan disertai dengan mineralisasi P-organik yang lambat menentukan rendahnya ketersediaan fosfor yang menjadi faktor pembatas ketersediaan unsur hara P (Iis, 2003).

2.2. Pertumbuhan dan Produktifitas Jagung

Jagung mempunyai umur berkisar 3-4 bulan. Pada dasarnya umur tanaman jagung juga dipengaruhi oleh suhu dan faktor lainnya. Selain itu, kemasaman tanah juga mempengaruhi pertumbuhan tanaman jagung karena dalam hal ini berkaitan dengan ketersediaan hara dalam tanah. pH yang baik untuk pertumbuhan jagung berkisar antara 5,5-7,0. Tanaman jagung akan tumbuh baik pada daerah dengan ketinggian 0-1300 mdpl. Tanah yang tingkat kemiringannya tidak lebih dari 8%, masih dapat ditanami jagung dengan arah barisan melintang searah kemiringan tanah, dengan maksud mencegah erosi tanah apabila ada hujan (Mattobii, 2004).

Produksi jagung tahun 2009 diperkirakan 18,12 juta ton pipilan kering. Dibandingkan produksi tahun 2008, terjadi kenaikan 522,86 ribu ton atau 2,97 %. Kenaikan produksi pada 2010 diperkirakan terjadi karena naiknya luas panen seluas 67,83 ribu ha atau 1,63 %, dan produktivitas sebesar 0,56 kw/ha atau 1,32 %. Namun ini belum mencapai swasembada pangan karena kebutuhan jagung di Indonesia cukup tinggi (BPPS, 2012).

2.2.1. Kebutuhan Unsur Hara Tanaman Jagung

Jagung merupakan tanaman yang membutuhkan unsur hara yang diserap melalui tanah. Unsur hara primer yang dibutuhkan tanaman jagung adalah N, P dan K, unsur hara ini diperlukan tanaman jagung dalam jumlah lebih banyak apabila dibandingkan dengan unsur hara lainnya (Ca, Mg, dan S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, dan Cl) diperlukan dalam jumlah yang relatif lebih sedikit (Tabel 1.). Dengan hara yang cukup, jagung akan memberikan hasil yang baik. Ada beberapa faktor yang mempengaruhi ketersediaan hara dalam tanah agar dapat diserap tanaman, diantaranya adalah total pasokan hara, kelembaban tanah dan aerasi, suhu tanah, dan sifat fisik maupun kimia tanah (Olson and Sander, 1988).

Tabel 1. Kandungan hara tanaman jagung (Olson and Sander, 1988).

Unsur hara	Kandungan hara (kg/ha)	
	Biji	Batang
N	129	62
P	31	8
K	39	157
Ca	1,5	39
Mg	11	33
S	12	9
Cl	4,5	76
Fe	0.11	2.02
Mn	0.06	0.28
Cu	0.02	0.09
Zn	0.19	0.19
B	0.05	0.14
Mo	0.006	0.003

2.3. Fosfor

Fosfor (P) merupakan unsur hara makro yang sangat dibutuhkan untuk menunjang pertumbuhan tanaman, walaupun kandungannya didalam tanaman lebih rendah bila dibanding nitrogen (N), kalium (K), dan kalsium (Ca). Tanaman yang kekurangan unsur P akan mengalami pertumbuhan yang terhambat, daun menjadi tipis dan kecil tidak mengkilat, daun dan buah rontok sebelum waktunya, serta daun mengalami nekrosis. Unsur hara P berikatan dengan oksigen yang disebut senyawa fosfat. Tanaman menyerap fosfat dalam bentuk ion fosfat anorganik terutama $H_2PO_4^-$, dan HPO_4^{2-} . Selain ion-ion tersebut, tanaman dapat menyerap P dalam bentuk asam nukleat, fitin, dan fosfohumat (Halvin *et al.*, 1999).

Fungsi P adalah untuk pembelahan sel, pembentukan albumin, pembentukan bunga, buah, dan biji dan berfungsi untuk mempercepat pematangan buah, memperkuat batang, untuk perkembangan akar, memperbaiki kualitas tanaman, metabolisme karbohidrat, membentuk nucleoprotein (sebagai penyusun RNA dan DNA), dan menyimpan serta memindahkan energi seperti ATP. Unsur P juga berfungsi untuk meningkatkan ketahanan tanaman terhadap penyakit. Pergerakan ion-ion pada umumnya disebabkan oleh proses difusi, namun apabila kandungan P larutan tanah cukup tinggi, maka proses aliran masa dapat berperan dalam transportasi tersebut. Ion yang sudah berada di permukaan akar akan menuju *outer space*/rongga luar akar melalui proses difusi sederhana maupun

kegiatan bahan pembawa. Kemudian ion memasuki rongga dalam akar dengan bantuan energi metabolisme, yang di kenal sebagai serapan aktif (Nyakpa *et al.*, 1998).

Fosfor memainkan peran yang tidak dapat dikesampingkan sebagai bahan bakar *universal* untuk kegiatan biokimia dalam sel hidup. Ikatan adenosin trifosfat (ATP) yang berenergi tinggi melepaskan energi untuk kegiatan bila diubah menjadi adenosin difosfat (ADP). Perbedaan utama antara daur N dan daur P dalam tanah adalah bahwa bentuk-bentuk nitrogen yang tersedia (amonium dan nitrat) merupakan ion-ion yang relatif stabil yang tetap digunakan tanaman. Sebaliknya H_2PO_4 cepat bereaksi dengan ion-ion yang lainnya dalam larutan tanah untuk menjadi sangat kurang larut atau tidak tersedia bagi tanaman (Illmer *et al.*, 1995).

Pada umumnya tanaman memanfaatkan P hanya sebesar 10-30% dari pupuk P yang diberikan, dengan demikian 70-90% pupuk P tetap berada di dalam tanah, selain itu tumbuhan juga tidak dapat menyerap fosfat yang terikat sehingga harus diubah menjadi bentuk yang dapat diserap oleh tanaman (Elfiati, 2005). Kekurangan pupuk P dapat diatasi dengan berbagai cara, salah satu cara yang biasa dilakukan adalah dengan memanfaatkan mikroba pelarut P sebagai pupuk hayati. Penggunaan mikroba pelarut P sebagai pupuk hayati mempunyai beberapa keunggulan salah satunya adalah mampu membantu meningkatkan kelarutan P yang terjerap. Pada jenis-jenis tanah tertentu, mikroba ini dapat memacu pertumbuhan tanaman kerana dapat menghasilkan zat pengatur tumbuh, serta menahan penetrasi pathogen akar karena sifat mikroba yang cepat (Jones, 1982).

2.3.1. Peranan P pada tanaman

Dalam bentuk anorganik fosfor banyak ditemukan di dalam cairan sel sebagai komponen sistem penyangga tanaman. Dalam bentuk organik, P terdiri sebagai: 1). Fosfolifid merupakan komponen membran sitoplasma dan kloroplas. 2). Fitin, merupakan simpanan fosfat dalam biji. 3). Gula fosfat, merupakan senyawa antara dalam berbagai proses metabolisme tanaman. 4). Nukleoprotein, komponen utama DNA dan RNA inti sel. 5). ATP, ADP, AMP, dan senyawa sejenis, sebagai senyawa berenergi tinggi untuk metabolisme. 6). FAD dan NADP, merupakan koenzim penting dalam proses reduksi dan oksidasi. 7). FAD dan

berbagai senyawa lain, berfungsi sebagai pelengkap enzim tanaman (Salisbury dan Ross, 1995).

Fosfor juga merupakan senyawa penyusun fitin, yakni bentuk utama P yang tersimpan dalam biji. Substansi ini merupakan garam kalsium dan magnesium inotisol asam heksafosfat, sedangkan P berperan penting dalam mengatur permeabilitas membran sel dan pengangkutan ion. Unsur P juga mempunyai peranan dalam membantu pembentukan akar halus maupun akar rambut, pembentukan bunga buah dan biji serta memperkuat daya tahan terhadap penyakit (Salisbury dan Ross, 1995).

Apabila tanaman kekurangan P maka akan mengakibatkan hambatan metabolisme, antara lain proses sintesis protein yang bisa mengakibatkan terjadinya akumulasi karbohidrat dan ikatan-ikatan nitrogen. Kekurangan P tanaman secara visual, yaitu daun yang tua akan berwarna keunguan atau kemerahan karena terbentuknya pigmen antisianin. Pigmen ini terbentuk karena akumulasi gula di dalam daun sebagai akibat terhambatnya sintesis protein. Gejala lainnya adalah nekrosis pada pinggir atau helai dan tangkai daun, dan diikuti melemahnya batang dan akar daun (Hue *et al.*, 1986).

Pada tanah fosfor dibedakan menjadi dua bentuk, yaitu P-organik dan P-anorganik yang mana kandungan P ini bervariasi pada setiap jenis tanah. Fosfor organik yang terdapat di dalam tanah sebanyak 50% dari P total tanah. Bentuk-bentuk fosfat ini berasal dari sisa tanaman, hewan, dan mikroba. Ketersediaan P-organik bagi tanaman sangat bergantung pada aktivitas mikroba untuk memineralsikannya. Enzim fosfatase adalah enzim yang paling berperan dalam melepaskan P dari ikatan P-organik. Enzim ini banyak dihasilkan oleh mikroba tanah, terutama yang bersifat heterotof. Aktivitas fosfatase dalam tanah meningkat dengan meningkatnya C-organik, pH, kelembaban, temperatur dan faktor lainnya. Apabila C-organik tinggi maka P-organik semakin meningkat. Fosfat anorganik dapat diimmobilisasi menjadi P-organik oleh mikroba dengan jumlah yang bervariasi antara 25-100% (Halvin *et al.*, 1999).

P-anorganik terdiri dari 2 jenis yakni, P aktif yang meliputi Ca-P, Al-P, Fe-P yang kedua adalah P tidak aktif, meliputi mineral P mineral fluor apatif. Pada umumnya fosfor anorganik di dalam tanah berasal dari mineral pada tanah

masam, kelarutan Al dan Fe menjadi tinggi. Dengan demikian, ion fosfat akan segera membentuk senyawa P yang kurang tersedia bagi tanaman. Ketersediaan P sebagai mineral tanah digambarkan dengan dasar bahwa adsorpsi terjadi pada permukaan oksida-oksida hidrat besi, aluminium dan liat. Kemampuan adsorpsi bergantung pada kadar liat, Fe dan Al terlarut, C-organik dan CaCO_3 . Pada tanah tropika basah, adsorpsi P terutama terjadi akibat adanya Fe dan Al terlarut, namun pada tanah berkapur adsorpsi P dilakukan oleh Ca. Adanya pengikatan P ini menyebabkan pemberian pupuk P menjadi tidak efisien (Sanchez, 1992).

2.3.2. Mekanisme Pelarutan P

Pada dasarnya fosfor relatif tidak mudah tercuci, namun akibat adanya pengaruh lingkungan menyebabkan statusnya berubah dari P yang tersedia bagi tanaman menjadi tidak tersedia, yakni dalam bentuk Ca-P, Mg-P, Fe-P atau *Occluded-P*. Mikroba pelarut P akan menghasilkan asam-asam organik antara lain: asam nitrat, glutamate, suksinat, laktat, oksalat, glioksalat, malat, fumarat, tartarat, dan α -ketobuturat (Illmer *et al.*, 1995). Meningkatnya asam organik biasanya diikuti dengan penurunan pH, sehingga mengakibatkan terjadinya pelarutan P yang terikat oleh Ca. Menurunnya kadar pH disebabkan terbebasnya asam sulfat dan nitrat pada oksidasi kemoautotrofik sulfur dan ammonium (Alexander, 1978).

Asam organik mampu meningkatkan ketersediaan P di dalam tanah melalui beberapa mekanisme, antara lain: 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 (Beaucamp dan Hume, 1997); 3. Modifikasi muatan permukaan tapak jerapan oleh ligan organik (Halvin *et al.*, 1999).

Pada tanah vulkanik asam-asam organik (benzoate, p-OH benzoate, salisilat, dan platat) tidak mampu menurunkan retensi P. Asam sitrat menjerap Fe jauh lebih banyak dibandingkan dengan tartarat dan juga dalam mengurangi P yang terjerap. 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 *et al.*, 1986). Menurut Premono (1994), *P. fluorescens* dan *P. putida* mampu meningkatkan P

yang terekstrak pada tanah masam sampai 50%. Pada tanah basa *P. putida* mampu meningkatkan P yang terekstrak sebesar 10%. Sedangkan menurut Setiawati (1998), menunjukkan bahwa *P. fluorescens* yang digunakanya mampu meningkatkan kelarutan P dari fosfat alam 16.4 ppm menjadi 59.9 ppm, meningkatkan kelarutan P dari $AlPO_4$ dari 28.5 ppm menjadi 30.6 ppm dan meningkatkan P tersedia tanah dari 17.7 ppm menjadi 34.8 ppm.

2.4. Bakteri *Pseudomonas fluorescens*

Agen hayati *P. fluorescens* merupakan bakteri yang dapat menghasilkan antibiotik. Bakteri ini bersifat PGPR (*Plant Growth Promoting Rhizobacteria*) dan mempunyai fungsi untuk memacu pertumbuhan tanaman dan juga menghambat pertumbuhan patogen (Soesanto, 2008).

Pseudomonas mempunyai batang lurus atau lengkung (Gambar 2), mempunyai ukuran sel bakteri $0.5-0.1 \mu\text{m} \times 1.5-4.0 \mu\text{m}$, tidak membentuk spora dan bereaksi negatif terhadap pewarnaan Gram, mempunyai tipe metabolisme respirasi dengan oksigen sebagai aseptor elektrton terminal. *Pseudomonas* spp. ialah jasad penghuni tanah, sisa tanaman dan rizosfer yang dapat tumbuh pada kisaran suhu $35^{\circ}-37^{\circ}\text{C}$ (Agrios, 1997). Adapun Klasifikasi dari *Pseudomonas fluorescens* yaitu,

Kingdom	: Bacteria
Phylum	: Proteobacteria
Class	: Gamma Proteobacteria
Family	: Pseudomonadaceae
Genus	: Pseudomonas
Spesies	: <i>Pseudomonas fluorescens</i>



Gambar 1. Bakteri *Pseudomonas fluorescens* (Agris,1997)

P. fluorescens yang hidup di daerah perakaran tanaman dapat berperan sebagai jasad renik pelarut fosfat, mengikat nitrogen dan menghasilkan zat pengatur tumbuh bagi tanaman sehingga dengan kemampuan tersebut *P. fluorescens* dapat dimanfaatkan sebagai pupuk biologis yang dapat menyediakan hara untuk pertumbuhan tanaman. *P. fluorescens* juga berperan sebagai pemacu pertumbuhan (PGPR) karena menghasilkan ZPT dan meningkatkan ketersediaan hara melalui produksi asam organik (Yulmira, 2009).

2.5.1. Kemampuan *P. fluorescens* dalam Melarutkan P

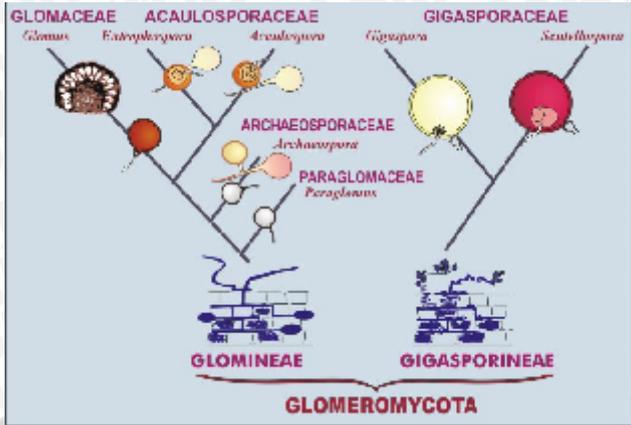
Bakteri *Pseudomonas sp.* merupakan agen hayati yang mempunyai banyak peran bagi tanah, salah satunya adalah kemampuan untuk melarutkan unsur hara P tanah, meningkatnya asam organik biasanya diikuti dengan pembentukan kelat dari Al dan Fe dengan asam organik tersebut sehingga P dapat larut dan P tersedia tanah meningkat. Mekanisme mikroorganisme dalam melarutkan P tanah yang terikat dan P yang berasal dari alam diduga karena asam-asam organik yang dihasilkan akan bereaksi dengan $AlPO_4$, $FePO_4$, dan $Ca(PO_4)_2$. Dari reaksi tersebut terbentuk khelat organik dari Al dan Fe, sehingga P terbebaskan dan larut serta tersedia untuk tanaman dengan kemampuan untuk melindungi akar dari infeksi patogen tanah dengan cara mengkolonisasi permukaan akar, menghasilkan senyawa kimia seperti antijamur dan antibiotik serta kompetisi dalam penyerapan kation Fe (Kartika, 2012). Bakteri ini juga menghasilkan fitohormon dalam jumlah yang besar khususnya IAA untuk merangsang pertumbuhan dan pemanjangan batang pada tanaman (Rao, 1994). Mekanisme pelarutan fosfat oleh bakteri pelarut fosfat diawali dari sekresi asam-

asam organik diantaranya asam formiat, asetat, propionat, laktat, glikolat, glioksilat, fumarat, tartat, ketobutirat, suksinat dan sitrat, dengan meningkatnya asam-asam organik tersebut akan diikuti dengan penurunan nilai pH sehingga mengakibatkan terjadinya pelarutan P yang terikat oleh Al dan Fe (Rohmah *et al.*, 2011).

2.6. Mikoriza

Mikoriza merupakan simbiosis antara fungi dengan akar tanaman. Mikoriza berperan dalam peningkatan penyerapan unsur-unsur hara tanah yang dibutuhkan oleh tanaman seperti P, N, K, Zn, Mg, Cu, dan Ca (Bagyaraj *et al.*, 1997). Mikoriza dikenal sebagai fungi tanah biotrof obligat yang tidak dapat melestariakan pertumbuhan dan reproduksinya apabila terpisah dari tanaman inang dan dicirikan dengan adanya struktur vesikel dan atau arbuskel. Arbuskel merupakan struktur dalam akar berbentuk seperti pohon yang berasal dari cabang-cabang hifa intraradikal setelah hifa cabang menembus dinding sel korteks dan terbentuk antara dinding sel dan membran plasma.

Mikoriza dibedakan menjadi dua kelompok besar yaitu fungi yang hidup di permukaan akar (ekto-mikoriza) dan yang hidup di dalam korteks akar (endo-mikoriza) yang juga dikenal sebagai Vesicular-Arbuscular Mycorrhiza (VAM). Fungi memiliki hypha atau miselium yang menembus jauh ke luar akar yang sangat bermanfaat untuk meningkatkan serapan P oleh tanaman inangnya. Berdasarkan pada morfologi sporanya, VAM dibagi dalam enam genus yaitu: Glomus, Gigaspora, Acaulospora, Sclerocystis dan Scutellospora, Entrophospora (Gambar 3.) Tipe-tipe mikoriza yang dikenal ada 2, yaitu: Ektomikoriza, strukturnya terdiri dari selimut miselium yang menyelimuti akar yang sel korteksnya membesar dan hifa cendawan yang masuk ke dalam ruang interselluler. Endomikoriza, strukturnya tidak membentuk selimut dengan hifa yang menginvasi sel korteks akar tanpa mematikannya.



Gambar 2. Perkembangan dan taksonomi ordo Glomeromyta (Nemec, 1983)

Menurut De La Cruz (1989), fungi berkembang biak dengan cara membentuk spora. Spora fungi yang ditemukan di dalam tanah dapat dipakai sebagai indikator keberadaan mikoriza dan pengenalan terhadap jenis mikoriza yang ada. Untuk mengetahui peran mikoriza dalam meningkatkan serapan P oleh akar tanaman, maka diperlukan perhitungan tingkat infeksi mikoriza, adapun perhitungan infeksi ini dilakukan dengan menggunakan metode dari Nemec (1983) yakni dengan melakukan pewarnaan akar tanaman yang terinfeksi mikoriza dan pengamatan melalui mikroskop. Selain penggunaan tehnik konvensional, penggunaan tehnik-tehnik molecular memang telah banyak digunakan. Berdasarkan taksonominya mikoriza terbagi menjadi 176 kelompok cendawan, yang terdiri dari 32 *Acaulospora*, 4 *entrophospora*, 3 *Archaeospora*, 98 *glomus*, 2 *paraglomous*, 8 *Gigaspora*, 29 *Scutellospora* (Tabel 2).

Tabel 2. Taksonomi Cendawan pembentuk MA

Filum	Ordo	Sub-ordo	Famili	Genus	
<i>Zygomycota</i>	<i>Glomeromycota</i>	<i>Glominae</i>	<i>Glomaceae</i>	<i>Glomus</i>	
			<i>Acaulosporaceae</i>	<i>Acaulospora</i>	
			<i>Archaeosporaceae</i>	<i>Archaeospora</i>	
			<i>Paraglomaceae</i>	<i>Paraglomus</i>	
			<i>Gigasporineae</i>	<i>Gigasporaceae</i>	<i>Gigaspora</i>
					<i>Scutellospora</i>

Penyebaran MA memang sangat luas di seluruh dunia, terutama di daerah tropis (Gerdermann, 1968), selain itu perkembangan MA juga bisa ditemukan di habitat air. MA Pertama kali dilaporkan di Indonesia berasal dari Janse (1896).

Berdasarkan hasil penelitiannya di kebun Raya Cibodas, terdapat kolonisasi mikoriza pada 69 spesies dari 75 yang diperiksa. Spesies ini termasuk pada 56 famili dari Bryophyta, Pteridophyta, Gymnospermae, dan Angiospermae.

2.6.1. Kemampuan Mikoriza dalam Menyediakan P

Menurut Huda (2000), terdapat 3 mekanisme mikoriza dalam meningkatkan ketersediaan P dan pengambilannya terbagi menjadi beberapa macam, yaitu:

Mekanisme Fisik

Akar tanaman yang terinfeksi MA dapat lebih mudah dalam mengambil fosfor dengan cara memperluas permukaan serapan akar. Miselium fungi yang berada di luar akar analog sebagai rambut akar yang berfungsi untuk mengambil bahan makanan yang dibutuhkan oleh tanaman. Miselium fungi ini dapat tumbuh menyebar keluar akar hingga mencapai >9 cm, sehingga dapat berfungsi sebagai jembatan yang menghubungkan zona kekosongan bahan makanan terutama P disekitar akar tanaman.

Mekanisme Kimia

MA dapat mendorong perubahan pH pada rizosfer, perubahan ini dapat terjadi melalui produk eksudat fungi berupa anion-anion seperti poligalakturonat, sitrat, dan oksalat. Ion tersebut secara alami dapat menetralkan pH rizosfer, hal ini disebabkan oleh sifat asam sitrat dan oksalat yang masam dan juga sifat alkalin fosfatase dan poligalakturonat yang bersifat basa (Kurniawan, 2005).

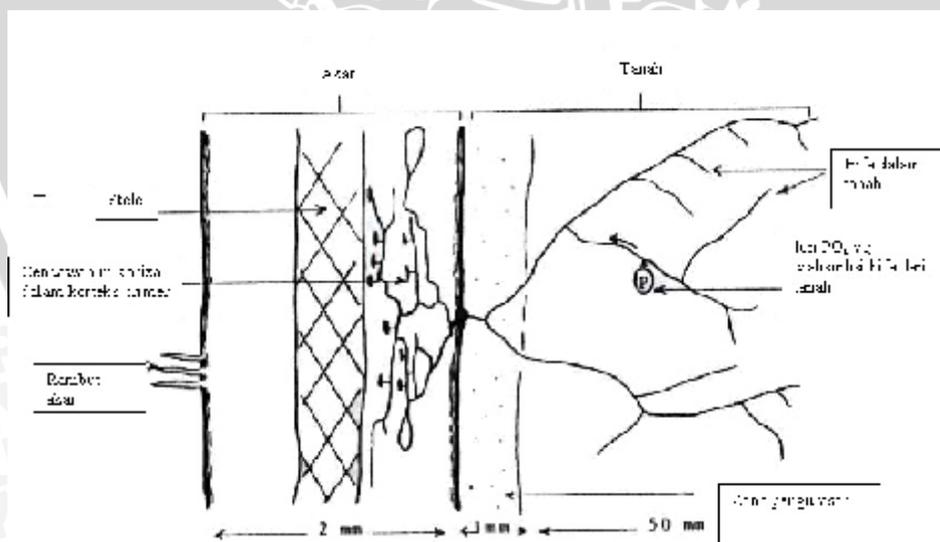
Mekanisme Fisiologi

Hifa fungi yang berada pada akar tanaman dapat menyerap P dari larutan tanah pada konsentrasi rendah, diameter fungi yang relatif kecil yakni 2-5 μ m akan dengan mudah untuk menembus pori-pori mikro yang tidak dapat dimasuki oleh rambut akar yang relatif lebih besar. Huda (2000), menyatakan bahwa terdapat 2 faktor fisiologi yang dapat mempengaruhi mikrotofi suatu tanaman, yakni tingkat pertumbuhan tanaman dan juga kandungan P minimum untuk daun sehat. Apabila tanaman telah diinokulasi mikoriza namun masih mengalami pertumbuhan yang lambat berarti penyerapan P oleh tanaman tersebut juga rendah.

Menurut Tinker (1975), mekanisme penyerapan P terdiri dari beberapa macam, antara lain:

1. Mikoriza memiliki akses terhadap sumber P-anorganik yang relatif tidak dapat larut yang tidak dimiliki oleh akar yang tidak mempunyai kandungan mikoriza.
2. Kolonisasi mikoriza mengubah metabolisme tanaman inang sehingga absorpsi atau pemanfaatan P oleh akar terkolonisasi ditingkatkan.
3. Hifa dalam tanah mengabsorpsi P dan mengangkutnya ke akar-akar yang dikolonisasi, dari sini P ditransfer ke inang bermikoriza, dengan demikian mengakibatkan meningkatnya volume tanah yang dapat dijangkau oleh sistem akar tanaman.
4. Daerah akar bermikoriza tetap aktif dalam mengabsorpsi hara untuk jangka waktu yang lebih lama bila dibandingkan dengan akar yang tidak mengandung mikoriza.

Menurut Mosse (1996), Pada dasarnya MA memiliki hifa yang menjalar keluar di dalam tanah, hifa tersebut meluas di dalam tanah dan ketika fosfat di sekitar rambut akar telah habis maka hifa tersebut membantu menyerap fosfat dari tempat yang tidak dapat dijangkau oleh rambut akar (Gambar 4).



Gambar 3. Skema penyerapan P oleh akar bermikoriza (Mosse, 1996).

P diangkut melalui hifa eksternal dalam bentuk polifosfat. Adanya granula polifosfat dalam vakuola hifa telah dibuktikan melalui mikroskop elektron (Cox *et al.*, 1975). Penyerapan P pada permukaan akar lebih cepat dari pergerakan

fosfat ke permukaan akar, sehingga dapat menyerap fosfat dari tempat yang tidak dapat dicapai oleh akar yang tidak bermikoriza.

2.6.2. Faktor yang mempengaruhi Perkembangan Mikoriza

Mikoriza masuk kedalam akar melalui tekanan mekanis dan aktivitas enzim, kemudian tumbuh menjadi korteks. Pertumbuhan hifa secara eksternal terjadi jika hifa internal tumbuh dari korteks melalui epidermis, hifa eksternal berfungsi untuk mendukung fungsi reproduksi dan untuk transportasi karbon maupun hara lainya kedalam spora (Pujianto, 2001).

Menurut Atmaja dan Dana (2001), pertumbuhan mikoriza sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Suhu

Pada suhu yang tinggi maka aktivitas mikoriza akan meningkat, proses perkecambahan pembentukan mikoriza terjadi melalui tiga tahap yaitu perkecambahan spora di dalam tanah, penetrasi hifa ke dalam sel akar, dan perkecambahan hifa di dalam konteks akar. Di wilayah subtropika mikoriza jenis gigaspora yang diisolasi dari afrika mengalami perkecambahan paling baik pada suhu 34⁰C, sedangkan spesies glomus yang berasal dari wilayah beriklim dingin, suhu optimal untuk perkecambahan adalah 20⁰C. Infeksi mikoriza akan meningkat diiringi dengan semakin meningkatnya suhu. Peran mikoriza hanya menurun pada suhu diatas 40⁰C. Pada dasarnya suhu bukanlah faktor pembatas utama yang mempengaruhi perkembangan mikoriza.

2. Kadar air tanah

Tanaman yang tumbuh di daerah kering dengan adanya MA dapat menguntungkan bagi tanaman tersebut karena pada dasarnya MA dapat meningkatkan kemampuan tanaman untuk tumbuh dan bertahan pada kondisi yang kurang air (Pujianto, 2001). MA juga dapat memperbaiki dan meningkatkan kapasitas serapan air tanaman inang. Tanaman yang mengandung mikoriza lebih tahan terhadap kekeringan disebabkan akibat adanya hifa eksternal yang mana tanaman tersebut lebih mampu mendapatkan air apabila dibandingkan dengan tanaman tidak mengandung mikoriza, selain itu tanaman kahat P lebih peka terhadap kekeringan,

adanya MA menyebabkan status P tanaman meningkat sehingga menyebabkan daya tahan terhadap kekeringan juga meningkat.

3. pH tanah

Pada umumnya MA lebih tahan terhadap perubahan pH tanah, namun daya hidup masing-masing mikoriza berbeda, karena pH tanah dapat mempengaruhi perkecambahan dan perkembangan dari mikoriza. Peran *G. fasciculatus* dalam meningkatkan pertumbuhan di tanah masam menurun akibat adanya pengapuran (Santoso, 1989). Pada pH 5,1 dan 5,9 *G. fasciculatus* menampakkan pertumbuhan yang terbesar juga memperlihatkan pengaruh yang lebih besar terhadap pertumbuhan tanaman yakni pada pH netral-alkalis (6,0-8,1).

4. Bahan organik

Jumlah spora dari mikoriza sangat berhubungan erat dengan bahan organik. Jumlah maksimum spora ditemukan pada tanah-tanah yang mengandung bahan organik 1-2%, sedangkan pada tanah yang mengandung bahan organik kurang dari 0,5% kandungan spora sangat rendah (Pujiyanto, 2001).

5. Cahaya dan ketersediaan hara

Peran mikoriza yang erat dengan ketersediaan P bagi tanaman menunjukkan keterikatan khusus antara mikoriza dengan status P tanah. Pada wilayah beriklim sedang konsentrasi P tanah yang tinggi menyebabkan menurunnya infeksi MA yang disebabkan konsentrasi P internal yang tinggi dalam jaringan inang (Santoso, 1989). Pemupukan N (188 kg/ha) berpengaruh buruk terhadap populasi MA, pemupukan N lebih berpengaruh bila dibandingkan dengan pemupukan P (Atmaja, 2001).