

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Unsur P Dalam Tanah

Fosfat tersedia di dalam tanah yang mampu diserap oleh tanaman nilainya hanya sekitar 0,01 dari total P yang ada. Keadaan ini diakibatkan oleh adanya koloid tanah yang menyerap fosfat sehingga tidak dapat diserap oleh tanaman (Suriadikarta dan Simanungkalit, 2006). Keduanya juga menjelaskan bahwa mayoritas lahan sawah di Indonesia telah jenuh fosfat akibat pemupukan P yang terus menerus dilakukan. Jerapan fosfat oleh koloid tanah menyebabkan pupuk yang diberikan tidak efisien, sebab hanya sekitar 15% hingga 20% saja yang mampu diserap oleh tanaman, sisanya akan menjadi terakumulasi menjadi residu P dalam tanah.

Fosfor (P) merupakan salah satu unsur hara makro yang dibutuhkan oleh tanaman. Fosfat di dalam tanah terdapat dalam bentuk fosfat anorganik dan fosfat organik. Tanaman mampu menyerap fosfor dalam bentuk anorganik, seperti ion HPO_4^- atau ion H_2PO_4^- . Fosfor organik mengandung senyawa-senyawa yang berasal dari tanaman dan mikroba yang tersusun dari asam nukleat, fosfolipid dan fitin. Pada proses mineralisasi bahan organik, senyawa fosfor organik diuraikan menjadi bentuk fosfor anorganik yang tersedia bagi tanaman dengan bantuan enzim fosfatase. Sumber fosfor organik banyak ditemukan dalam sampah tanaman yang mati dan telah membusuk (Raharjo, Supriyadi, dan Agustina, 2007).

Penyerapan P oleh tanaman umumnya terjadi melalui proses difusi. Proses aliran massa dapat berperan dalam transportasi P tanaman jika kandungan P dalam tanah cukup tinggi (Saribun, 2008). Tanaman memerlukan P pada semua tingkat pertumbuhan terutama pada awal pertumbuhan. Fosfor dalam tanaman lebih kecil diserap dibandingkan dengan nitrogen dan kalium. Unsur fosfor bagi tanaman sangat berguna untuk merangsang pertumbuhan akar, khususnya akar benih dan tanaman muda. Selain itu, fosfor berfungsi sebagai bahan mentah untuk pembentukan sejumlah protein tertentu, membantu asimilasi dan pernafasan, serta mempercepat pembungaan, pemasakan biji, dan buah (Lingga dan Marsono, 2006). Fosfor adalah hara makro esensial yang memegang peranan penting dalam berbagai proses, seperti fotosintesis, asimilasi, dan respirasi. Fosfor merupakan

komponen struktural dari sejumlah senyawa molekul pentransfer energi ADP, ATP, NAD, NADH, serta senyawa sistem informasi genetik DNA dan RNA (Gardner, Pearce, dan Mitchell, 1985).

Mekanisme mikroorganisme tanah melarutkan P sukar larut dalam tanah yakni dengan adanya ekskresi asam organik dari mikroorganisme dalam rizosfer. Tanah sawah di beberapa tempat di Indonesia diketahui memiliki P tersemat (*occluded* P) yang tinggi sehingga tidak perlu dipupuk P. Jumlah fosfat maksimum yang dapat dilarutkan dari seluruh bentuk-bentuk fosfat anorganik yang tidak larut dalam tanah dapat dicapai pada pH 6.5 (Hardjowigeno dan Rayes, 2005).

Pada proses glikolisis, pernafasan atau fotosintesis energi dilepaskan dan digunakan untuk menyusun ikatan pirofosfat yang kaya energi. Fosfor merupakan senyawa penyusun jaringan tanaman seperti asam nukleat, fosfolipida, dan fitin. Fosfor yang diserap tanaman dalam bentuk ion anorganik cepat berubah menjadi senyawa fosfor organik. Fosfor ini mudah bergerak dalam jaringan tanaman. Kadar optimal fosfor dalam tanaman pada saat pertumbuhan vegetatif adalah 0.3%-0.5% dari berat kering tanaman. Dalam tanaman, P dalam bentuk organik seperti fitat relatif lebih tinggi dibandingkan P dalam bentuk anorganik (Rosmarkam dan Yuwono, 2011).

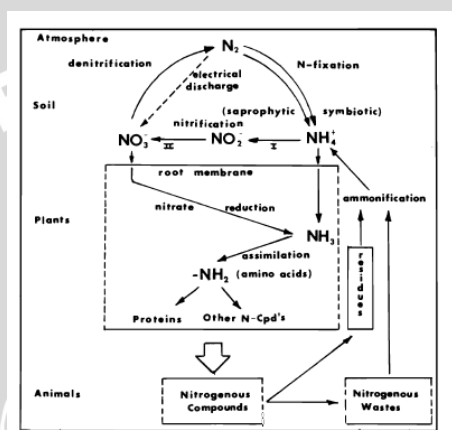
Kekurangan unsur P umumnya menyebabkan volume jaringan tanaman menjadi lebih kecil dan warna daun menjadi lebih gelap. Terkadang, nitrat dalam tanaman menjadi lebih tinggi karena proses perubahan nitrat terhambat. Warna daun menjadi keunguan dan kecokelatan serta pembentukan antosianin terhambat.



Gambar 1. Gejala Kekurangan P (Ketterings, 2014)

2.2. Unsur Nitrogen

Dari semua unsur hara, unsur N dibutuhkan dalam jumlah paling banyak tetapi ketersediaannya selalu rendah karena mobilitasnya dalam tanah sangat tinggi. Nitrogen secara umum dapat dibagi menjadi dua yaitu nitrogen organik dan anorganik. Bentuk N anorganik adalah amonium (NH_4^+) dan nitrat (NO_3^-), bentuk N_2 dan NO merupakan bentuk yang hilang sebagai gas akibat proses denitrifikasi. Tanaman menyerap nitrogen dalam bentuk amonium dan nitrat, ion-ion ini berasal dari pemupukan dan dekomposisi bahan organik (Benbi dan Richter, 2002).



Gambar 2. Siklus Nitrogen (Gallitz, 2013)

Transformasi biologis N organik mineral N, yaitu menjadi NH_4^+ dan NO_3^- dilaksanakan oleh kelompok bakteri dan dipengaruhi oleh faktor-faktor yang mempengaruhi kehidupan bakteri tersebut seperti suhu, kelembaban, pH, ketersediaan hara, dan lain-lain. Transformasi bahan organik tahap pertama adalah amonifikasi, yaitu proses biologis yang merubah N organik menjadi NH_4^+ . Selanjutnya, dari bentuk tersebut akan dirubah menjadi nitrit (NO_2^-) oleh genus bakteri *Nitrosococcus* dan *Nitrosomonas* dan terakhir dari bentuk nitrit menjadi nitrat (NO_3^-) oleh genus bakteri *Nitrobacter*. Dalam kondisi lingkungan yang baik, hanya dua per tiga dari jumlah N yang diberikan lewat pemupukan N yang diangkut oleh tanaman dan selebihnya hilang melalui berbagai proses seperti pencucian, volatilisasi, dan denitrifikasi (Setijono, 1996).

Mineralisasi atau amonifikasi organik N merupakan salah satu fungsi mikroorganisme terpenting dalam tanah. Terutama dalam kaitannya dengan pertumbuhan tanaman. Bentuk N-organik merupakan bentuk N yang dominan

dalam tanah sawah, yakni berupa asam amino, amonium yang mudah terhidrolisis dan gula amino. Ketiga fraksi tersebut merupakan sumber N utama dalam tanah sawah. Transformasi N yang terpenting adalah mineralisasi dan imobilisasi. Bila tanah sawah dikeringkan, maka fraksi nitrogen yang termineralisasi adalah alfa asam amino dan gula amino yang berasal dari bahan kompleks peptid dalam dinding sel, bukan dalam sitoplasma. Tanah padi sawah mengandung D-alanin dalam jumlah yang sama dengan yang ditemukan dalam dinding sel bakteri. Asam amino merupakan penyusun dinding sel bakteri. Pengeringan tanah sawah sebelum penggenangan dapat memperbaiki pertumbuhan tanaman padi karena akumulasi N-anorganik dalam tanah akibat mineralisasi N-organik. (Hardjowigeno dan Rayes, 2005)

2.3. Bakteri Pelarut Fosfat

Hasil penelitian Widiawati dan Suliasih (2006) menyatakan bahwa bakteri *Pseudomonas* merupakan bakteri pelarut fosfat yang memiliki kemampuan terbesar sebagai *biofertilizer* dengan cara melarutkan unsur fosfat yang terikat pada unsur lain (Fe, Al, Ca, dan Mg), sehingga unsur P tersebut menjadi tersedia bagi tanaman. Salah satu spesies dari keluarga *Pseudomonas* adalah *Pseudomonas fluorescens* (PF), bakteri ini merupakan bakteri gram negatif yang berbentuk lurus atau batang agak melengkung, bersifat khemoautotrof, metabolisme secara aerob, serta tidak mampu memfiksasi nitrogen (Hirlaka, 2006). Selain merupakan salah satu bakteri pelarut fosfat, *Pseudomonas fluorescens* dikenal pula sebagai *Plant Growth Promoting Rhizobia* (PGPR) sebab *P. fluorescens* berasosiasi pada permukaan atau jaringan tanaman menyebabkan perkembangan bakteri patogenik terhambat sehingga dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman, serta dapat menghasilkan hormon pertumbuhan dan peningkatan ketahanan tanaman terhadap penyakit (Choudhary *et al.*, 2009)

Keberadaan mikroorganisme ini berkaitan dengan banyaknya jumlah bahan organik yang secara langsung mempengaruhi jumlah dan aktivitas hidupnya. Akar tanaman mempengaruhi kehidupan mikroorganisme dan secara fisiologis mikroorganisme yang berada dekat dengan daerah perakaran akan lebih aktif daripada yang hidup jauh dari daerah perakaran. Keberadaan mikroorganisme

pelarut fosfat dari suatu tempat ke tempat lainnya sangat beragam. Salah satu faktor yang menyebabkan keragaman tersebut adalah sifat biologisnya.

Pertumbuhan mikroorganisme pelarut fosfat sangat dipengaruhi oleh kemasaman tanah. Pada tanah masam, aktivitas mikroorganisme didominasi oleh kelompok fungi sebab pertumbuhan fungi optimum pada pH 5-5,5. Pertumbuhan fungi menurun bila pH meningkat. Pertumbuhan kelompok bakteri optimum pada pH sekitar netral dan meningkat seiring dengan meningkatnya pH tanah (Suriadikarta dan Simanungkalit, 2006). Faktor lingkungan yang mempengaruhi keanekaragaman bakteri dalam tanah antara lain kelembaban tanah, aerasi, suhu, bahan organik, derajat kemasaman (pH), dan suplai hara. Sebagian bakteri dapat hidup pada kondisi ekstrim dengan membentuk endospora (Alexander, 1977). Namun demikian, menurut Choudhary *et al.* (2009) *Pseudomonas fluorescens* tidak mampu tumbuh di bawah kondisi asam.

Menurut Winarwi (2006) nutrisi merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi pertumbuhan bakteri, tidak semua bakteri membutuhkan nutrisi (zat makanan) yang sama. Ada bakteri yang dapat hidup dari zat-zat organik saja, tetapi ada pula bakteri yang tidak dapat hidup jika tidak ada zat organik. Kebanyakan bakteri membutuhkan zat-zat organik seperti garam-garam yang mengandung Na, K, Ca, Mg, Fe, Cl, S, P, sedangkan beberapa spesies tertentu masih membutuhkan tambahan mineral seperti Mn dan Mo. Kecuali zat-zat tersebut, bakteri memerlukan juga sumber-sumber makanan yang mengandung C, H, O dan N yang berguna untuk menyusun protoplasma.

Bakteri pelarut fosfat berpotensi meningkatkan ketersediaan fosfat terlarut bagi tanaman, terutama pada tanah yang mengalami defisiensi fosfat. Bakteri pelarut fosfat yang sering digunakan dalam pupuk hayati antara lain *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Rhizobium* dan *Bradyrhizobium* (Gunawan, 2011). Hasil penelitian Widiawati dan Suliasih (2006) menyatakan bahwa bakteri *Pseudomonas* merupakan bakteri pelarut fosfat yang memiliki kemampuan terbesar sebagai *biofertilizer* dengan cara melarutkan unsur fosfat yang terikat pada unsur lain (Fe, Al, Ca, dan Mg), sehingga unsur P tersebut menjadi tersedia bagi tanaman. Dalam penelitiannya, Winarwi (2006) menjelaskan bahwa strain *Pseudomonas sp* yang diisolasi dari bahan klinik sering mempunyai pili untuk

perlekatan pada permukaan gel dan memegang peranan penting dalam resistensi terhadap fagositosis.



Gambar 3. *Pseudomonas fluorescens* Pf0-1 (U.S. Department of Energy, 2015)

Suriadikarta dan Simanungkalit (2006) menyatakan bahwa akar tanaman mempengaruhi kehidupan mikroorganisme. Secara fisiologis mikroorganisme yang berada dekat dengan daerah perakaran akan lebih aktif daripada yang hidup jauh dari daerah perakaran. Populasi bakteri pelarut fosfat umumnya lebih rendah pada daerah yang beriklim kering dibandingkan dengan daerah yang beriklim sedang.

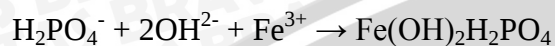
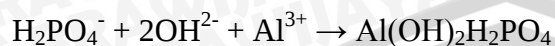
Bakteri menyukai media dengan kandungan protein tinggi (Kartika, 2011). Dari hasil penelitian Premono dan Widiastuti (1994) media pembawa kompos-zeolit yang disimpan pada suhu 28⁰ C merupakan bahan pembawa yang terbaik. Medium kompos lebih baik dibandingkan gambut dalam mempertahankan populasi *Pseudomonas*, dan penambahan zeolit menjadikan medium pembawa tersebut semakin baik karena zeolit mempunyai sifat khusus yaitu mempunyai kisi-kisi yang saling berhubungan dan mempunyai kapasitas menahan zat alir yang tinggi (Mumpton, 1984).

2.4. Mekanisme Pelarutan Fosfat

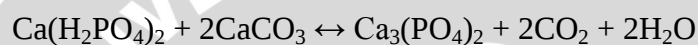
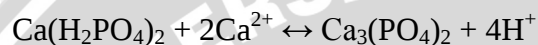
Pelarutan P oleh perakaran tanaman dan mikroba tergantung pada pH tanah. Fosfat di dalam tanah terdapat dalam bentuk fosfat anorganik dan fosfat organik. Bentuk anorganiknya berupa senyawa-senyawa Ca-fosfat, Fe-fosfat dan Al-fosfat.

Fosfor selalu diserap oleh tanaman sebagai H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} dan PO_4^{3-} yang terutama berada di dalam larutan tanah.

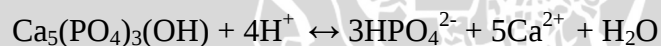
Menurut Mas'ud (1993), tanah masam dengan $\text{pH} < 5,5$ didominasi oleh kation Fe^{3+} dan Al^{3+} yang mengikat anion H_2PO_4^- dan mengendapkannya sebagai hidroksi Fe-fosfat dan Al-fosfat melalui reaksi :



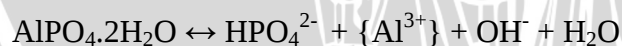
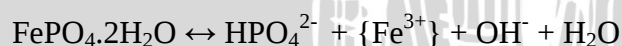
Sedangkan pada $\text{pH} > 6,0$ sistem tanah didominasi oleh kation Ca^{2+} dan Mg^{2+} yang juga mampu mengikat H_2PO_4^- dari tanah maupun pupuk fosfat sehingga menjadi dalam bentuk tidak tersedia melalui reaksi :



Menurut Vega (2007), ketika bakteri pelarut fosfat ditambahkan pada tanah yang bereaksi netral hingga basa, produksi asam akan menurunkan pH rhizosfer sehingga memperbaiki kelarutan kalsium fosfat (CaHPO_4) dan apatit ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$)

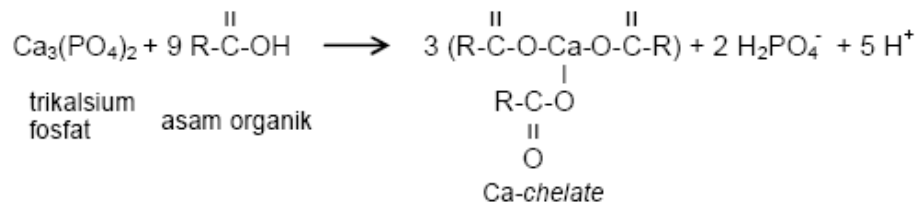


Ortofosfat yang mampu dibebaskan dari kalsium fosfat atau apatit segera bereaksi dengan kation Al dan Fe akibat penurunan pH dan diendapkan sebagai mineral strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dan varicite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).



Menurut Setijono (1996), fungsi ligand (khelat organik) dalam pelarutan senyawa-senyawa P sukar larut dan mineral-mineral P adalah dengan membentuk senyawa-senyawa kompleks dengan Ca, Al, atau Fe sehingga anion-anion fosfat akan dibebaskan dalam larutan tanah. Berikut merupakan salah satu reaksi yang menunjukkan pelarutan fosfat melalui khelat organik.





Sebagian dari bakteri genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* dan sebagian dari fungi genus *Penicillium* dan *Aspergillus* memiliki kemampuan untuk melarutkan P tidak larut dalam tanah menjadi larut dengan mengeluarkan asam-asam organik (Rao, 1982). Asam sitrat, glutamate, suksinat, laktat, asam formiat, asetat, propionate, glikolat, okasalat, malat, fumarat, tartrat, dan α -ketobutirat merupakan contoh asam-asam organik yang mampu mengkhelat kation-kation logam Al^{3+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} (Alexander, 1977).

Anion organik yang berasal dari asam organik akan menuju kompleks jerapan fosfat sehingga sebagian ortofosfat yang terlepas tetap berada pada larutan tanah karena tidak bisa menempati lokasi fiksasi pada kompleks jerapan (Vega, 2007). Asam-asam organik tersebut bersifat non folatil sehingga kation yang dikhelat menjadi bentuk stabil sehingga ion H_2PO_4^- menjadi bebas dari ikatannya dan tersedia bagi tanaman untuk diserap (Rao, 1982). Pelarutan ortofosfat dari fosfat organik merupakan proses enzimatik. Enzim fosfatase diekskresikan keluar membran plasma bakteri dalam bentuk larutan atau ditahan sebagai protein yang terikat membran (Khan *et al.*, 2009).

2.5. Kompos

Hasil pengomposan berbahan baku sampah dinyatakan aman untuk digunakan bila sampah organik telah dikomposkan dengan sempurna. Salah satu indikatornya terlihat dari kematangan kompos yang meliputi karakteristik fisik seperti bau, warna, tekstur yang telah menyerupai tanah, penyusutan berat mencapai 60%, pH netral, dan suhu yang stabil (Sulistyawati, Mashita, dan Devi, 2007).

Melalui penelitiannya, Adiningsih (1999) menunjukkan bahwa analisis kandungan hara jerami yang masih segar yaitu sekitar 36,74% C, 0,87% N, 0,18% P, 1,79% K, 0,25% Ca, 0,18% Mg, dan 0,08% S. Jika jerami padi dibakar, akan menyebabkan kehilangan unsur hara berturut-turut: 94% C, 91% N, 45% P, 75% K, 70% S, 30% Ca, dan 20% Mg. Menurut Sutanto (2012), dalam lima ton jerami padi setidaknya terkandung 30 kg N, 7 kg P dan S, 20 kg Ca, 5 kg Mg, dan 350 kg Si. Jerami padi juga mengandung kurang lebih 1.0%-3.7% kalium dalam bentuk tersedia.

Pada proses pengomposan, kotoran ayam dapat menjadi starter yang mempercepat proses tersebut. Hal ini dapat ditunjukkan dari hasil penelitian Yusnaini *et al.* (1996), bahwa proses pengomposan yang dicampur dengan kotoran ayam hasilnya lebih cepat matang daripada yang tidak menggunakan kotoran ayam. Salikin (2007) menambahkan bahwa kotoran ayam masih mengandung protein sebesar 14%. Kotoran ayam termasuk bahan pupuk yang baik bagi tanaman karena mengandung unsur hara N sebesar 5.0%, P 3.0%, K₂O 1.5%, CaO 4.0%, MgO 1.0%, SO₄⁻ 2.0% (Sarpian, 2007). Umumnya, kotoran ayam mengandung N yang tinggi dan sedikit kering (Djaja, 2008).

Menurut Setiadi dan Parimin (2006), abu dapur yang berasal dari kayu mengandung 6-12% K₂O. Dalam proses pengomposan sering ditambahkan kapur atau abu dapur untuk meningkatkan pH (Indriani, 2007). Makin tinggi kadar pH dalam timbunan kompos maka makin cepat terjadi penguraian bahan (Murbandono, 2000). Menurut Djuarnani, Kristian, dan Setiawan (2005), kisaran kompos optimum adalah 6.0 hingga 8.0. Derajat keasaman yang terlalu tinggi akan menyebabkan unsur nitrogen dalam bahan kompos berubah menjadi amonia (NH₃). Hasil penelitian Risse dan Harris (2012) menunjukkan bahwa abu kayu

memiliki efek pengapuran antara 8 hingga 90 % dari total daya penetralisir kapur dan dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman hingga 45 % dibandingkan batu kapur tradisional. Melihat potensi abu sebagai sumber nutrisi yang cukup tinggi dan memiliki efek pengapuran, maka abu dapat digunakan sebagai campuran dalam pembuatan kompos limbah pertanian (Ekawati dan Purwanto, 2012). Menurut Hakim *et al* (1986), pemberian abu yang cukup pada tanah akan meningkatkan kandungan Ca, sehingga ion H yang terjerap pada koloid tanah berangsur-angsur melepaskan ion H yang terjerap pada koloid tanah. Dengan demikian pH tanah reaksinya naik sampai menuju keadaan netral. Bakteri memerlukan fosfor terutama dalam bentuk fosfat yang diperlukan oleh bakteri sebagai komponen struktur sel dan simpanan energi (Volk dan Wheeler, 1998).

