

Ishak MUSAAD

POTENSI DAN TEKNOLOGI PEMANFAATAN FOSFAT ALAM SEBAGAI PUPUK FOSFAT-PLUS



IbIKK Iptek bagi Inovasi dan Kreativitas Kampus

Penerbit  **Brainy Bee**
2018

Copyright@ 2018 oleh Ishak MUSAAD

Perpustakaan Nasional: Katalog dalam terbitan (KDT)

Ishak MUSAAD. Potensi dan Teknologi Pemanfaatan Fosfat Alam sebagai Pupuk Fosfat-Plus

- Cet.1- Malang:

vi + 78 h.; 23,5 cm

Indeks

ISBN

Buku ini merupakan salah satu output IBIKK (Iptek bagi Inovasi dan Kreativitas Kampus) yang didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi

Desain sampul dan isi Ishak MUSAAD

Cetakan 1, November 2018

Diterbitkan pertama kali oleh Penerbit Brainy Bee, Malang

All rights reserved
Hak penerbitan kepada Penerbit Brainy Bee



Penerbit **Brainy Bee**
2018

Pengantar

Puji syukur Penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena berkat dan rahmat-Nya buku ini dapat terselesaikan seperti bentuk dan isinya sekarang. Buku ini adalah wujud pengabdian dan tanggung jawab Penulis sebagai akademisi yang memiliki tugas pokok dan fungsi yang berhubungan dengan tridharma perguruan tinggi dan ilmu tanah pertanian secara khusus.

Fosfat alam di Indonesia hingga saat ini belum dapat dikelola secara efisien dan kurang mendapat perhatian. Beberapa kendala pemanfaatan fosfat alam adalah belum adanya data yang akurat dari berbagai hasil survei mengenai potensi dan kualitas fosfat alam di seluruh Indonesia, serta cadangannya tersebar di berbagai daerah dan keragamannya sangat tinggi.

Buku **Potensi Fosfat Alam dan Teknologi Pemanfaatannya sebagai Pupuk Fosfat-Plus** merupakan kompilasi hasil kajian pustaka dan penelitian lapangan yang dilakukan Penulis bertahun-tahun. Buku memuat berbagai informasi mengenai genesis, karakteristik, potensi, dan teknologi pemanfaatan fosfat alam di Indonesia. Secara khusus buku ini memuat tentang kajian pemanfaatan Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru Kabupaten Maybrat. Dengan selesainya buku ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak atas kontribusinya, sehingga buku ini dapat diselesaikan.

Penulis telah berusaha menyusun buku ini dengan sebaik-baiknya, namun apabila terdapat kesalahan dan kekurangan Penulis terbuka untuk mendapat masukan dan saran perbaikan. Oleh karena itu saran, masukan dan kritik sangat diharapkan untuk revisi buku pada waktu yang akan datang.

Manokwari, 30 November 2018

Penulis

Daftar Isi

PENGANTAR	III
DAFTAR ISI	IV
DAFTAR GAMBAR	V
DAFTAR TABEL	VI
DAFTAR LAMPIRAN	VI
1. MENINGKATKAN PRODUKSI PERTANIAN DENGAN PUPUK FOSFAT ALAM	1
1.1. PENDAHULUAN	1
1.2. PERMASALAHAN	3
2. FOSFAT, FOSFOR, DAN PUPUK FOSFAT	9
2.1. PUPUK FOSFAT	9
2.2. FOSFOR	11
2.3. FOSFAT DAN FOSFAT ALAM	12
3. GENESIS DAN KARAKTERISTIK FOSFAT ALAM	16
3.1. PEMBENTUKAN	16
3.2. KARAKTERISTIK	18
3.3. DINAMIKA	24
3.4. FRAKSI ORGANIK DAN INTERAKSINYA	26
3.5. STATUS AL DAN FE PADA TANAH MINERAL	30
4. FOSFAT ALAM AYAMARU	34
4.1. TANAH AYAMARU	34
4.2. TEFK	36
4.3. KLASIFIKASI	41
5. PEMANFAATAN FOSFAT ALAM	44
5.1. PEMUPUKAN	45
5.2. INDUSTRI	47
5.3. PEMANFAATAN RAMAH LINGKUNGAN	54
5.4. PENGOLAHAN INDUSTRI	58
6. PUPUK FOSFAT PAPUA NUTRIENT	62
6.1. PUPUK FOSFAT-PLUS	62
6.2. PEMBUATAN	64
6.3. SPESIFIKASI PRODUK	67
6.4. PEMASARAN	69
KESIMPULAN	69
DAFTAR PUSTAKA	74

Daftar Gambar

Gambar 1.1.	Tanah di Kampung Wargep (Fakfak). Petani lokal sedang mengolah tanah untuk perkebunan.	2
Gambar 1.2.	Sebaran cadangan fosfat alam di Indonesia	4
Gambar 2.1.	Siklus Fosfor. Kotak biru=masuk ke tanah, kotak jingga=hilang dari tanah, Kotak hijau=komponen	10
Gambar 2.2.	Tabel berkala. Posisi unsur fosfor dalam tabel berkala.	11
Gambar 2.3.	Ortofosfat, PO_4^{3-} .	13
Gambar 3.1.	Hubungan Antara pH dengan ketersediaan hara	25
Gambar 4.1.	Batuan Induk Daerah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru	35
Gambar 4.2.	Topografi Daerah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru	36
Gambar 4.3.	Struktur Mineral Krandalit	39
Gambar 4.4.	Struktur Mineral Krandalit (Ditemukan: Tahun 1917).	40
Gambar 4.5.	Profil Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru	42
Gambar 6.1.	Bahan baku (20%) pupuk	62
Gambar 6.2.	Alat Granulator	63
Gambar 6.3.	Bagan alir proses produksi	64
Gambar 6.4.	Bagan alir proses produksi untuk memperoleh formula Pupuk Cair	65
Gambar 6.5	Panen Pupuk Fosfat Granul setelah proses pengeringan	66
Gambar 6.6.	Pupuk Papua Nutrient: Fosfat cair- <i>Plus</i>	66
Gambar 6.7.	Pupuk Fosfat- <i>Plus</i> padat	67
Gambar 6.8.	Pemasaran Pupuk	68
Gambar 6.9.	Produk pesanan dari Kabupaten Fak-fak (Papua Barat)	68

Daftar Tabel

Tabel 1.1.	Deposit P-Alam dari Hasil-hasil Explorasi Tahun 1968-1985 oleh Proyek Inventarisasi dan Survei Mineral Untuk Industri (Mursidi, 1987)	4
Tabel 1.2.	Syarat Mutu Pupuk Fosfat Alam (SNI No.02-3776-1995) (Adiningsih, et al, 1997).	6
Tabel 3.1.	Substitusi ion-ion dalam Fluor apatit 20	20
Tabel 3.2.	Beberapa Sifat Mineral Apatit dan Krandalit	21
Tabel 4.1.	Hasil Analisis Tanah yang Berasal dari Ayamaru (Schroo, 1963)	38
Tabel 4.2.	Uraian Profil TEFK Ayamaru	41

Daftar Lampiran

L.1.	Suvei lokasi di SP2 Prafi	74
L.2.	Salah satu jenis pupuk bantuan pemerintah	74
L.3.	Bahan baku kotoran ternak	74
L.4.	Bahan baku limbah sawit	74
L.5.	Penyerahan produk kepada petani	74
L.6.	Bangunan tempat produksi	74
L.7.	Ruang Produksi IBIKK	75
L.8.	Usaha Ikutan: Tanaman Hias	75
L.9.	Penulis (dua dari kanan) dengan tokoh masyarakat dan pimpinan lembaga penelitian Universitas Papua	75
L.10.	Penulis dengan petani pengguna pupuk fosfat Papua Nutrient	75
L. 11.	Percobaan dan Penelitian menggunakan pupuk lokal	76
L.12.	Panen tanaman yang menggunakan pupuk fosfat lokal	76
L.13.	Tanaman yang menggunakan pupuk fosfat lokal	77
L.14.	Sertifikat Paten	77
L. 15.	Beberapa slide presentasi saat seminar penelitian	78
L.16.	Hasil Kegiatan IBIKK 2016-2018	79

1 ■ Meningkatkan Produksi Pertanian dengan Pupuk Fosfat Alam

1.1. Pendahuluan

Pembangunan sektor pertanian dan perkebunan memiliki peranan strategis dalam perekonomian bangsa, dan masyarakat pertanian secara khusus. Selain sebagai penghasil komoditas yang dapat meningkatkan pendapatan, sektor ini juga menjadi penyedia tenaga kerja terbesar, sumber bahan baku industri, sumber bahan bakar nabati (energi terbarukan), dan sumber pendapatan masyarakat. Secara tidak langsung pengembangan sektor pertanian dan perkebunan rakyat akan berperan menanggulangi kemiskinan, karena sebagian besar penduduk bekerja, memiliki keahlian dan sumber pendapatan dari sektor ini.

Usaha peningkatan produksi pertanian dan perkebunan sangat bergantung pada kualitas sumberdaya lahan, sumberdaya petani, infrastruktur pertanian dan faktor produksi lainnya. Faktor yang paling mendasar adalah kesungguhan kita membangun sektor pertanian dan perkebunan secara profesional. Penerapan hasil-hasil penelitian yang strategis dan kemampuan mentransfer teknologi tepatguna agar dapat diadopsi petani menuju pertanian yang lebih maju dan mandiri perlu diupayakan oleh pemerintah maupun swasta.

Bercocok tanama merupakan sumber mata pencaharian sebagian besar masyarakat di pedesaan. Secara khusus petani lokal di Tanah Papua umumnya menempati lahan-lahan marginal dengan tingkat kesuburan tanah yang relatif rendah. Tuntutan hidup membuat petani harus berkebun walaupun di lahan-lahan marginal. Petani melakukan sistem perladangan berpindah karena ingin memperoleh hasil tani yang memadai. Pembinaan dan inovasi teknologi tepat guna berbasis sumberdaya dan kearifan lokal sangat dibutuhkan. Sentuhan teknologi budidaya pertanian secara berkelanjutan, terencana, dan terukur mutlak diperlukan untuk meningkatkan taraf hidup mereka. Kolaborasi antar ilmu pengetahuan (IPTEK) yang dimiliki perguruan tinggi, kebijakan pemerintah serta peran swasta dengan memperhatikan aspek sosial

budaya merupakan jalan pintas menuju kemajuan, kesejahteraan dan kemandirian.

1.2. Permasalahan

Pembangunan sektor pertanian dan perkebunan di Indonesia dan secara khusus di Provinsi Papua dan Papua Barat dihadapkan pada berbagai permasalahan yaitu:

1. Wilayah yang sangat luas dan kondisi geografis yang sulit dijangkau serta minimnya infrastruktur mengakibatkan tingginya biaya transportasi. Hal ini menyebabkan petani memperoleh sarana produksi pertanian seperti benih dan pupuk sangat mahal.
2. Lahan-lahan pertanian di Papua umumnya tidak subur, karena tanah terbentuk dari batuan non vulkanik dan vulkanik tua. Hal ini menyebabkan ketersediaan hara tanaman rendah, umumnya tanah bereaksi masam atau pH rendah. Rendahnya pH tanah memberikan indikasi rendahnya serapan unsur hara.



Gambar 1.1. Tanah di Kampung Wargep (Fakfak). Petani lokal sedang mengolah tanah untuk bercocok tanam.

3. Penyediaan pupuk yang sangat terbatas, minimnya tenaga penyuluh dan rendahnya kemampuan petani dalam mengadopsi teknologi, maka diperlukan pendekatan dengan mengacu pada konsep pembangunan pertanian berbasis sumberdaya lokal dengan Teknologi Masukan Rendah (*Low Input Technology*).
4. Belum adanya pupuk pengganti ketika terjadi kelangkaan pupuk subsidi terutama di daerah sentra-sentra pertanian.
5. Tingginya ketergantungan petani transmigran terhadap pupuk kimia yang dapat mengakibatkan penurunan kualitas tanah pertanian di

Tanah Papua, sehingga produksi akan stagnan meskipun dilakukan pemupukan.

6. Lemahnya modal petani dalam penerapan pemupukan berimbang sehingga produksi dan kualitas hasil panen terutama padi, jagung, dan kedelai relatif rendah dan selalu di bawah produksi rerata nasional.

Permasalahan di atas merupakan permasalahan mendasar, dan harus segera dicarikan solusinya selain permasalahan lainnya seperti penanganan pasca panen, pemasaran, aspek sosial budaya, dan sebagainya. Dampak permasalahan tersebut adalah:

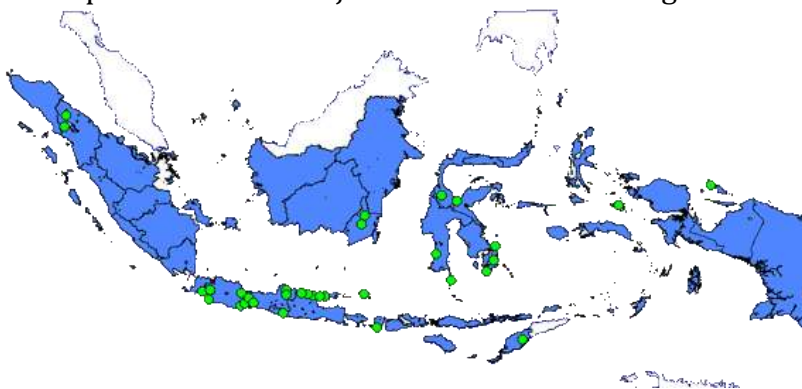
1. Alokasi dana pengembangan sektor pertanian dan perkebunan yang tersedia tidak mencukupi.
2. Kebutuhan pupuk majemuk (hara makro dan mikro) untuk peningkatan produksi tanaman pertanian dan perkebunan belum terpenuhi.
3. Hasil Pertanian dan perkebunan tidak menentu akibat dampak perubahan iklim dan ketidak seimbangan nutrisi tanaman.
4. Penyediaan pupuk subsidi tidak tepat sasaran.
5. Produk pertanian seperti padi, kedelai, jagung, sayuran dan buah-buahan tidak mampu bersaing dengan produk impor sehingga kurang diminati konsumen. Peningkatan produksi dan kualitas hasil dapat dilakukan melalui pengelolaan sumberdaya lahan yang tepat.

Potensi Fosfat Alam

Cadangan deposit fosfat alam menyediakan sekitar 80 – 90% produksi fosfat dunia. Fosfat alam terbentuk pada berbagai umur geologi sehingga memiliki sifat-sifat fisik, kimia, dan mineralogy yang beragam. Deposit fosfat alam terdistribusi di berbagai belahan dunia berdasarkan letak Geografis dan Geology. Diperkirakan terdapatv 200-300 milyar ton cadangan fosfat alam dengan berbagai kualitas yang terdapat di dunia.

Deposit terbesar terdapat di Marokko, dan sebagian negara-negara di Afrika, Amerika serikat, dan Cina. Deposit fosfat umumnya mengandung karbonat-fluorapatit yang dikenal dengan Francolit. Frankolit dengan konsentrasi karbonat tinggi akan disubstitusi oleh senyawa fosfat umumnya sangat reaktif dan sangat sesuai digunakan secara langsung sebagai pupuk fosfat atau amandemen tanah. Penggunaan fosfat alam di Indonesia masih sangat terbatas, karena kadar P-nya bervariasi dan kurangnya sosialisasi hasil-hasil penelitian fosfat alam kepada para petani.

Deposit fosfat alam di Indonesia relatif sedikit untuk memenuhi kebutuhan fosfat pada tanah-tanah mineral masam. Penyebaran cadangan fosfat alam di Indonesia disajikan pada peta (Gambar 1.1.). Daerah yang memiliki deposit batuan fosfat di Indonesia yang telah diinventarisasi oleh Departemen Pertambangan disajikan pada Tabel 1.1. Tabel ini memperlihatkan deposit fosfat alam di Indonesia yang berkisar dari 500 sampai 187.000 ton saja dan tersebar di berbagai daerah.



Gambar 1.1. Sebaran cadangan fosfat alam di Indonesia

Tabel 1.1. Deposit P-Alam dari Hasil-hasil Explorasi Tahun 1968-1985 oleh Proyek Inventarisasi dan Survei Mineral Untuk Industri (Mursidi, 1987)

Lokasi	Prakiraan Cadangan (ton)	Kadar P ₂ O ₅ (%)
Jawa Barat		
Lebak dan Rangkasbitung (1)	4.000	23,00 - 30,00
Cibinong dan Lewiliang (2)	t.d	t.d
Cigugur, Cijulang, Parigi, Ciamis, dan lain-lain	99.459	1,00 - 38,00
Jawa Tengah		
Sukolilo dan Brati, Pati, Karangrayung, Grobogan	119.000 54.500	10,00 - 38,00 25,99
Jawa Timur		
Tuban	25.831	28,00
Lamongan	186.680	31,00
Gresik	25.500	29,50
Madura	74.518	28,00
Kalimantan		
Kandangan	75.240	12,48 - 37,00
Sulawesi Tenggara		
P. Kakabiya	45.000	0,37 - 25,12
Papua		

Misool	t.d	3,00 – 8,00
Anjawi	2500	3,00
Ayamaru	t.d	1,00 - 28,00

Endapan fosfat di Indonesia ditemukan tersebar di beberapa lokasi. Lokasi endapan sebagian besar terdapat di Pulau Jawa dan Madura, dan sisanya terdapat di Kalimantan, Sulawesi dan Tanah Papua. Jenis endapan fosfat di Indonesia umumnya adalah endapan guano. Total endapan fosfat di Jawa dan Madura diperkirakan berkisar antara 9,5 – 20 juta ton (Bisri dan Permana, 1991). Hingga saat ini baru sebagian kecil fosfat alam di Indonesia yang sudah diidentifikasi.

Deposit fosfat alam di Indonesia memang relatif kecil untuk memenuhi kebutuhan fosfat terutama pada tanah-tanah masam. Negara-negara yang memiliki deposit fosfat lebih dari 500 juta ton adalah Algeria, Marokko, Tunisia, Mesir, Rusia, Australia, dan Amerika (Catchart, J.B, 1980 *dalam* Subiksa, 1999).

Kualitas fosfat alam secara langsung menentukan efektivitas penggunaannya. Kualitas ditentukan antara lain reaktivitasnya, ukuran butir, kandungan sesquiodsida, dan kandungan P. Reaktivitas merupakan kemampuan fosfat alam untuk melepaskan hara P yang diukur dengan pengekstrak ammonium sitrat netral, asam sitrat 2% dan asam formiat 2%. Makin tinggi kelarutannya dalam ketiga pengekstrak tersebut maka reaktivitasnya makin tinggi. Sebagai bahan tambang, fosfat alam memiliki sifat fisik dan kimia yang bervariasi. Secara kasat mata, variasi tersebut sulit dideteksi sehingga dalam perdagangan mudah dimanipulasi. Oleh karena itu diperlukan pengawasan mutu yang ketat serta standarisasi bahan untuk menghindari manipulasi yang merugikan konsumen.

Standarisasi mengacu pada SNI yang menggolongkan fosfat alam sebagai sumber P berkualitas A, B, dan C (Tabel 1.2). Secara agronomis, keefektifan fosfat alam ditentukan berdasarkan nilai RAE (*relative agronomic effectiveness*) dengan persamaan sebagai berikut:

$$RAE = \frac{Yp\text{-alam} - Yk}{Yp\text{-kon} - Yk} \times 100\%$$

$$Yp\text{-kon} - Yk$$

Dimana RAE = Relative Agronomic Effectiveness

Yp-alam = Hasil yang diperoleh dari penambahan P-alam

Yp-kon = Hasil yang diperoleh dari penambahan P konvensional

Yk = Hasil yang diperoleh dari perlakuan kontrol

Tabel 1.2. Syarat Mutu Pupuk Fosfat Alam (SNI No.02-3776-1995)
(Adiningsih, et al, 1997).

No	Uraian	Persyaratan		
		Kualitas A	Kualitas B	Kualitas C
1.	Kadar Fosfat (P_2O_5):			
	a. Total (asam mineral)	Min 28%	Min 24%	Min 18%
		Min 10%	Min 8%	Min 6%
	b. Larut asam sitrat 2%			
2.	Kadar Ca, Mg setara CaO	Min 40%	Min 40%	Min 35%
3.	Kadar R_2O_3 ($Al_2O_3 + Fe_2O_3$)	Maks 3%	Maks 6%	Maks 15%
4.	Kadar air	Maks 3%	Maks 3%	Maks 3%
5.	Kehalusan			
	a. Lolos 80 mesh	Min 50%	Min 50%	Min 50%
	b. Lolos 25 mesh	Min 80%	Min 80%	Min 80%

1.3. Pupuk Kimia *versus* Pupuk Alam

Pembangunan sektor pertanian dan perkebunan rakyat di khususnya di Provinsi Papua Barat memiliki peranan strategis dalam perekonomian daerah karena sektor ini menyumbang PDRB tertinggi setelah sektor pertambangan dengan menyerap tenaga kerja lebih banyak dari sektor lainnya. Usaha peningkatan produksi pertanian dan perkebunan sangat bergantung pada kualitas sumberdaya lahan, sumberdaya petani, infrastruktur pertanian dan faktor produksi lainnya. Penerapan hasil-hasil penelitian yang strategis dan kemampuan menstransfer teknologi tepat guna agar dapat diadopsi petani menuju pertanian yang lebih maju dan mandiri perlu dusahakan oleh pemerintah maupun swasta. Terkait dengan masalah tersebut, pupuk merupakan salah satu sarana produksi yang sangat penting dalam bidang pertanian dan perkebunan karena penggunaan yang tepat mampu meningkatkan kuantitas dan kualitas produk pertanian yang dihasilkan. Kebutuhan pupuk baik anorganik maupun organik di Indonesia terus meningkat, seiring dengan meningkatnya permintaan produk pertanian dan perkebunan, terutama padi, palawija, tanaman hortikultura, kelapa sawit, dan kakao.

Data survei tahun 2011 menunjukkan bahwa kebutuhan pupuk organik di Indonesia mencapai 12,3 juta ton dan diprediksi meningkat menjadi lebih dari 13 juta ton pada tahun 2014, sedangkan pupuk anorganik mencapai 6,58 juta ton dengan nilai subsidi pemerintah mencapai lebih dari 15 Trilyun. Kebutuhan pupuk NPK bersubsidi pada tahun 2013 mencapai 4,5 juta ton, sedangkan tanpa subsidi mencapai 1,2 juta ton. Sejalan dengan upaya peningkatan produksi pangan dan dampak perubahan iklim, permintaan impor pupuk juga terus meningkat karena meningkatnya konsumsi pupuk secara langsung dan kebutuhan bahan baku pabrik pupuk. Nilai impor pupuk pada tahun 2010 lebih dari 9,5 trilyun rupiah (Saleh, 2010).

Pertanian organik yang dianjurkan pemerintah saat ini tidak sepenuhnya dapat diterapkan oleh petani karena berbagai kendala. Input pupuk organik untuk memenuhi kebutuhan hara tanaman pada lahan-lahan yang tidak subur diperlukan takaran tinggi berkisar 10 – 20 ton per hektar karena konsentrasi hara N, P, K, dan hara mikro yang terkandung dalam bahan organik sangat rendah, meskipun bahan organik dapat memperbaiki sifat-sifat tanah lainnya. Hal ini menyebabkan penggunaan pupuk organik perlu dimodifikasi dengan pupuk anorganik yang bersumber dari bahan baku lokal untuk memenuhi kebutuhan hara bagi tanaman. Sebagian besar petani saat ini hanya menggunakan pupuk yang disubsidi pemerintah yaitu Urea dan SP-36, sedangkan Phonska atau NPK hanya sebagian kecil saja petani yang menggunakannya, karena selain harganya lebih mahal juga ketersediaannya ditingkat usaha tani masih terbatas. Selain pupuk yang disubsidi pemerintah, berbagai jenis pupuk anorganik maupun organik telah beredar di pasaran dengan komposisi yang beragam dan sebagian telah digunakan petani Transmigrasi di Papua Barat.

Pemupukan fosfat sering tidak efisien karena fosfat terikat menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman (Tisdale et al., 1993). Dari berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa kurang lebih hanya 10 – 30% dari pupuk P yang diberikan ke tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Hal ini disebabkan karena adanya proses fiksasi yang kuat dari mineral liat serta ion-ion Al, Fe terhadap P larutan yang bersumber dari pupuk yang diberikan. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan P dan mengurangi fiksasi oleh mineral liat serta ion-ion Al dan Fe dapat dilakukan dengan pemberian bahan organik baik dalam bentuk padat maupun setelah difraksionasi.

Data statistik menunjukkan bahwa penggunaan pupuk anorganik dan organik di Provinsi Papua dan Papua Barat juga terus meningkat dan lebih dari 90% merupakan pupuk yang disediakan pemerintah dan

belum tersedianya pupuk-pupuk lokal yang dapat digunakan oleh petani. Penggunaan pupuk anorganik sudah saatnya dibatasi oleh pemerintah dan berorientasi pada penerapan teknologi dengan memanfaatkan sumberdaya lokal dan berbasis organik secara bertahap. Saat ini di Provinsi Papua Barat banyak beredar pupuk anorganik maupun organik padat dan cair yang seluruhnya didatangkan dari luar Provinsi Papua Barat dan sampai saat ini belum ada pupuk lokal yang beredar di pasaran. Diharapkan dengan adanya pupuk yang diproduksi secara lokal melalui program IbKK Pupuk Fosfat-*Plus* UNIPA ini harganya lebih murah, penggunaan dan keberhasilannya dapat dipantau dan dievaluasi sehingga dapat dihasilkan formula yang lebih tepat dan bersifat spesifik lokasi.

Penggunaan pupuk kimia sudah saatnya dibatasi oleh pemerintah dan berorientasi pada penerapan teknologi dengan memanfaatkan sumberdaya lokal dan berbasis organik secara bertahap. Para penyuluh perlu secara intensif mendorong para petani untuk menggunakan pupuk berbasis organik dengan dilakukan ujicoba melalui demplot (demonstrasi plot) atau dempar (demonstrasi area). Penggunaan pupuk kompos dapat meningkatkan produksi tanaman dan lebih ramah lingkungan tetapi dibutuhkan dalam jumlah banyak (5-20 ton ha⁻¹). Pilihan ini kurang ekonomis dan tidak dapat dipenuhi oleh petani secara mandiri. Solusinya adalah memodifikasi penggunaan pupuk organik disertai penggunaan larutan nutrisi tanaman yang tersedia seperti "Pupuk Papua Nutrient" yang diproduksi Fakultas Pertanian Universitas Papua (Faperta UNIPA). Pupuk tersebut diformulasi sehingga menghasilkan nutrisi lengkap untuk memenuhi kebutuhan tanaman. Ujicoba Pupuk Papua Nutrient telah dilakukan di beberapa lokasi dan teknologinya telah dipatenkan. Hak Paten dari Kemenkumham RI, No. ID P0030110, tertanggal 3 Februari 2012.

Buku ini menyajikan potensi fosfat alam dan teknologi pemanfaatannya dalam bidang pertanian, yang menyangkut pemanfaatan fosfat alam sebagai pupuk, ketersediaan, dinamika, dan pengaruhnya terhadap pertumbuhan tanaman terutama berkaitan dengan fosfat alam lokal asal Papua.

2. Fosfat, Fosfor, dan Pupuk Fosfat

Membicarakan fosfat tidak akan lepas dari membicarakan fosfor. Demikian juga dengan pupuk fosfat, terkait dengan fosfor dan fosfat. Fosfor, fosfat, dan pupuk fosfat adalah tiga istilah yang sulit dipisahkan karena memiliki keterkaitan satu dengan yang lain. Ketiga istilah akan sering ditemui dalam buku ini. Bab awal ini menginformasikan ketiganya sebagai pengantar umum.

2.1. Pupuk Fosfat

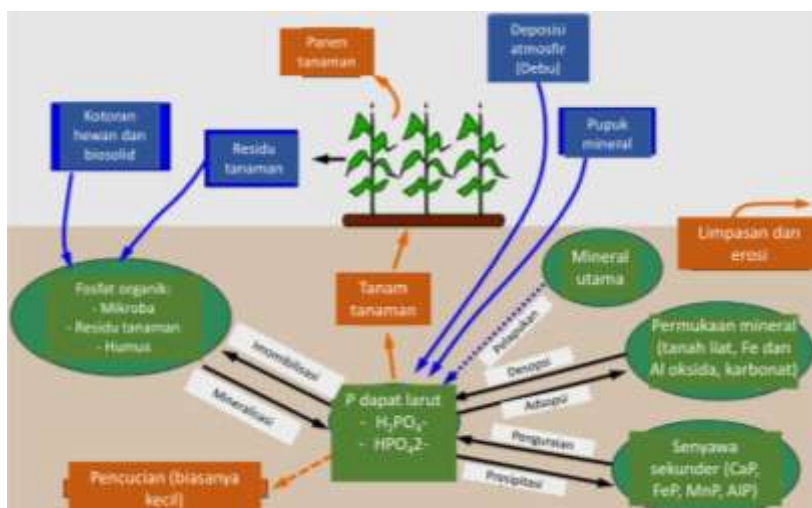
Unsur fosfor dalam senyawa fosfat sangat berguna bagi tumbuhan karena berfungsi untuk merangsang pertumbuhan akar terutama pada awal-awal pertumbuhan, mempercepat pembungaan, pemasakan biji dan buah. Fosfat adalah bentuk anion utama yang menyediakan unsur fosfor bagi tanaman. Ion fosfat sangat vital karena menjadi bagian utama kerangka bahan genetik tanaman (DNA dan RNA) serta menjadi pembawa energi pada senyawa ATP (*Adenosine Triphosphat* atau adenosin trifosfat) dan NADP. Karena itu, ketersediaan fosfat yang mencukupi dalam produksi tanaman sangat penting.

Untuk pemupukan tanah, fosfat dapat langsung digunakan setelah terlebih dahulu dihaluskan (sebagai pupuk alam). Akan tetapi untuk tanaman pangan seperti padi, jagung, kedelai, dan lain-lain, pupuk alam ini tidak cocok, karena daya larutnya yang sangat kecil di dalam air sehingga sulit diserap oleh akar tanaman pangan tersebut. Tingkat uji pupuk fosfat ditentukan oleh jumlah kandungan N (nitrogen), P (fosfat atau P_2O_5), dan K (potas cair atau K_2O). Untuk itu sebagai pupuk tanaman pangan, fosfat perlu diolah menjadi pupuk buatan. Pupuk superfosfat terdiri atas *Single Super Phosphate* (SSP), *Triple Super Phosphate* (TSP), *Monoammonium Phosphate* (MAP), *Diammonium Phosphate* (DAP), *Nitro Phosphate* (NP), *Ammonium Nitro Phosphate* (ANP).

Pupuk yang biasa diberikan untuk memasok fosfat adalah SP36 (36% P_2O_5) dan TSP. Pupuk yang disebut terakhir ini sudah tidak tersedia lagi di pasar Indonesia. Keduanya diproduksi dari tambang

fosfat. Bentuk pupuk fosfat lain diperoleh dari bagian hewan dan diperdagangkan dalam kondisi alami atau diproses tidak lengkap, seperti guano, kotoran burung laut, atau tepung tulang.

Siklus fosfor adalah proses perubahan fosfat dari fosfat anorganik menjadi fosfat organik dan kembali menjadi fosfat anorganik secara kesinambungan dan tanpa jeda. Siklus fosfor diawali dengan pembentukan fosfat anorganik oleh alam. Fosfor terdapat di alam dalam bentuk ion fosfat (PO_4^{3-}) dan banyak terdapat pada batu-batuan. Batu-batuan yang kaya dengan fosfat yang mengalami erosi dan pelapukan terkikis dan hanyut oleh air membentuk larutan fosfat. Larutan fosfat kemudian diserap oleh tumbuhan dan makhluk hidup autotrof seperti protista fotosintesis dan Cyanobacteri. Manusia dan hewan memperoleh fosfat dari tumbuhan yang dimakannya. Jika kandungan fosfat dalam tubuh makhluk hidup berlebihan maka fosfat akan dikeluarkan kembali ke alam dalam bentuk urin ataupun feces yang kemudian diuraikan oleh bakteri pengurai kembali menjadi fosfat anorganik. Selain dari sisa-sisa metabolisme tubuh, fosfat juga di peroleh dari dekomposisi makhluk hidup yang telah mati oleh bakteri pengurai.



Sumber:

https://en.wikipedia.org/wiki/Phosphorus_cycle#/media/File:Phosphorus_Cycle_copy.jpg

Gambar 2.1. Siklus Fosfor. Kotak biru=masuk ke tanah, kotak jingga=hilang dari tanah, Kotak hijau=komponen

Perputaran unsur fosfor dalam lingkungan hidup relatif sederhana bila dibandingkan dengan perputaran bahan kimia lainnya, tetapi mempunyai peranan yang sangat penting yaitu sebagai pembawa energi dalam bentuk ATP. Perputaran unsur fosfor adalah perputaran

bahan kimia yang menghasilkan endapan seperti halnya perputaran kalsium. Dalam lingkungan hidup ini tidak ditemukan senyawa fosfor dalam bentuk gas, unsur fosfor yang terdapat dalam atmosfer adalah partikel-partikel fosfor padat. Batu karang fosfat dalam tanah terkikis karena pengaruh iklim menjadi senyawa-senyawa fosfat yang terlarut dalam air tanah dan dapat digunakan/diambil oleh tumbuh-tumbuhan untuk kebutuhan hidupnya /pertumbuhannya. Penguraian senyawa organik (tumbuh-tumbuhan dan hewan yang mati serta detergen limbah rumah tangga) menghasilkan senyawa-senyawa fosfat yang dapat menyuburkan tanah untuk pertanian. Sebagai senyawa fosfat yang terlarut dalam air tanah akan terbawa oleh aliran air sungai menuju ke laut atau ke danau, kemudian mengendap pada dasar laut atau dasar danau.

2.2. Fosfor

Fosfor (*Phosphorus*, P) merupakan unsur hara yang diperlukan dalam jumlah besar (hara makro). Jumlah fosfor dalam tanaman lebih kecil dibandingkan Nitrogen dan Kalium, namun fosfor dianggap sebagai kunci kehidupan (*key of life*). Unsur ini merupakan komponen tiap sel hidup dan cenderung terkonsentrasi dalam biji dan titik tumbuh tanaman. Fosfor adalah suatu unsur kimia dalam tabel periodik yang memiliki lambang P dan nomor atom 15. Fosfor termasuk unsur nonlogam, terletak pada golongan VA dan periode III

The image shows a periodic table with a callout box for Phosphorus (P). The callout box contains the following information:

- Nomor Atom: 15
- Lambang Kimia: P
- Nama Unsur: PHOSPHORUS
- Berat Atom: 31

The periodic table is color-coded by groups: LOGAM (metals) in shades of blue and green, and NON-LOGAM (non-metals) in shades of orange and red. A legend at the bottom left identifies states of matter: Padat pada suhu kamar (solid at room temperature), Cair pada suhu kamar (liquid at room temperature), Gas pada suhu kamar (gas at room temperature), Radioaktif (radioactive), and Stabil (stable).

Gambar 2.2. Tabel berkala. Posisi unsur fosfor dalam tabel berkala.

Fosfor memiliki karakteristik bergerak lambat dalam tanah; pencucian bukan masalah, kecuali pada tanah yang berpasir. Fosfor lebih banyak berada dalam bentuk anorganik dibandingkan organik. Di dalam tanah kandungan fosfor total bisa tinggi tetapi hanya sedikit yang tersedia bagi tanaman. Tanaman menambang fosfor tanah dalam jumlah lebih kecil dibandingkan nitrogen dan kalium (*potassium*, K).

Fosfor merupakan salah satu bahan kimia yang sangat penting bagi makhluk hidup. Fungsi fosfor pada tanaman yaitu: (1) untuk pembentukan bunga dan buah, (2) bahan pembentuk inti sel dan dinding sel, (3) mendorong pertumbuhan akar muda dan pemasakan biji pembentukan klorofil, (4) penting untuk enzim-enzim pernapasan, pembentukan klorofil, (5) penting dalam cadangan dan transfer energi (ADP+ATP) (6) komponen asam nukleat (DNA dan RNA), (7) berfungsi untuk pengangkutan energi hasil metabolisme dalam tanaman.

Apabila tanaman mengalami kekurangan fosfor, maka terjadi gejala reduksi pertumbuhan, kerdil; daun berubah tua agak kemerahan; pada cabang, batang, dan tepi daun berwarna merah ungun yang lambat laun berubah menjadi kuning; pada buah tampak kecil dan cepat matang; menunda pemasakan; pembentukan biji gagal; dan perkembangan akar tidak bagus.

Fosfor terdapat di alam dalam dua bentuk yaitu senyawa fosfat organik dan senyawa fosfat anorganik. Tanaman menyerap fosfor dalam bentuk ion ortofosfat ($H_2PO_4^-$) dan ion ortofosfat sekunder (HPO_4^{2-}). Selain itu, unsur fosfor masih dapat diserap dalam bentuk lain, yaitu bentuk pirofosfat dan metafosfat, bahkan ada kemungkinan fosfor diserap dalam bentuk senyawa organik yang larut dalam air, misalnya asam nukleat. Fosfor yang diserap tanaman dalam bentuk ion anorganik cepat berubah menjadi senyawa fosfor organik. Fosfor ini mobil atau mudah bergerak antar jaringan tanaman. Kadar optimal fosfor dalam tanaman pada saat pertumbuhan vegetatif adalah 0.3% - 0.5% dari berat kering tanaman.

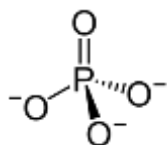
2.3. Fosfat dan Fosfat Alam

Fosfat adalah sumber utama unsur fosfor yang tidak larut dalam air, tetapi dapat diolah untuk memperoleh produk fosfat dengan menambahkan asam. Fosfat menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI) online (2018) adalah bahan asam fosfor yang dipakai untuk pupuk atau mineral senyawaan antara fosfor, oksigen, dan unsur lainnya. Fosfat merupakan hasil reaksi antara oksigen dengan mineral alami fosfor. Fosfat adalah salah satu mineral yang tersedia dalam jumlah cukup besar di alam. Zat ini juga merupakan nutrisi yang masuk

dalam golongan makronutrien atau nutrisi yang dibutuhkan oleh tubuh dalam jumlah makro atau banyak.

Menurut jenisnya, fosfat (P_2O_5) terdiri atas fosfat organik dan fosfat anorganik. Fosfat organik berasal dari makhluk hidup, seperti hewan dan tumbuhan. Fosfat organik juga terdapat dalam bentuk senyawa gula fosfat, fosfo protein, dan *nucleoprotein*. Fosfat organik diantaranya terdapat dalam tinja dan sisa makanan. Fosfat organik dapat pula terjadi dari ortofosfat yang terlarut melalui proses biologis karena baik bakteri maupun tanaman menyerap fosfat bagi pertumbuhannya (Alaerts, 1984).

Fosfat anorganik banyak terdapat di dalam tanah dan air. Fosfat mudah larut, sehingga senyawa fosfat yang terdapat di air tanah akan terlindi. Hasil akhirnya adalah mengendap dalam batuan sedimen. Bentuk fosfat ini berupa ortofosfat atau fosfat anorganik (*orthophosphate, inorganic phosphate, Pi*) atau sering disebut gugus fosfat dan polifosfat.



Gambar 2.3. Ortofosfat, PO_4^{3-} .

Di daerah pertanian ortofosfat berasal dari bahan pupuk yang masuk ke dalam sungai atau danau melalui drainase dan aliran air hujan. Dalam kimia, ortofosfat adalah ion poliatomik atau radikal terdiri atas satu atom fosfor dan empat oksigen. Dalam bentuk ionik, ortofosfat membawa -3 muatan formal dan dinotasikan PO_4^{3-} . Polifosfat dapat memasuki sungai melalui air buangan penduduk dan industri yang menggunakan bahan detergen yang mengandung fosfat, seperti industri logam dan sebagainya.

Fosfat adalah unsur dalam suatu batuan beku atau sedimen dengan kandungan fosfor ekonomis. Biasanya, kandungan fosfor dinyatakan sebagai *bone phosphate of lime* (BPL) atau *triphosphate of lime* (TPL), atau berdasarkan kandungan P_2O_5 . Fosfat apatit termasuk fosfat primer karena gugusan oksida fosfatnya terdapat dalam mineral apatit ($Ca_{10}(PO_4)_6.F_2$) yang terbentuk selama proses pembekuan magma. Kadang kadang, endapan fosfat berasosiasi dengan batuan beku alkali kompleks, terutama karbonit kompleks dan sienit.

Fosfat komersial dari mineral apatit adalah kalsium fluoro-fosfat dan kloro-fosfat dan sebagian kecil *wavellite*, (fosfat aluminium

hidros). Sumber lain dalam jumlah sedikit berasal dari jenis *slag*, guano, krandalit ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), dan *millisite* ($(\text{Na,K})\text{CaAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_9 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$). Fosfat dipasarkan dengan berbagai kandungan P_2O_5 , antara 4-42 %.

Fosfat alam merupakan salah satu bahan galian dan sumber hara fosfor (P) yang sangat penting bagi tanaman. Fosfor sebagai salah satu hara makro esensial berperan dalam transfer energi dalam sistem biologi semua makhluk hidup, dan tidak dapat digantikan oleh unsur yang lain (Busman *et al.*, 1998; Egawa, 1982). Fosfat masuk ke dalam biosfir melalui proses absorpsi oleh tanaman dan mikroorganisme.

Kerak bumi merupakan sumber utama fosfor tanah yang diduga mengandung kurang lebih 0,12% fosfor (Catchart, 1980). Fosfor dapat ditemukan di dalam tanah, batuan, air dan semua makhluk hidup dalam bentuk senyawa kompleks dengan berbagai unsur lainnya. Fosfor anorganik yang bersumber dari fosfat alam merupakan salah satu sumberdaya yang tidak dapat diperbaharui (*nonrenewable*).

Menurut Catchart (1980), batuan fosfat alam dihasilkan dari tiga jenis deposit yang berbeda yaitu guano (lihat kotak) atau turunan dari deposit guano (kotoran kelelawar yang dimatangkan), hasil dari batuan beku yang disebut deposit apatit, dan deposit sedimen yang disebut *phosphorites*.

Guano

Guano adalah tinja atau kotoran burung yang sering digunakan sebagai pupuk atau penyubur tanah pertanian secara alami. Pupuk guano merupakan bahan yang efektif untuk penyubur tanah karena memiliki kandungan fosfor dan nitrogen yang tinggi. Guano mengandung amonia, asam urat, asam fosfat, asam oksalat, dan asam karbonat, serta garam tanah. Tingginya kandungan nitrat juga menjadikan guano komoditas strategis; superfosfat dari guano digunakan untuk *topdressing*. Tanah yang kekurangan zat organik dapat dibuat lebih produktif dengan tambahan pupuk ini.

Guano dapat ditemukan di daerah yang iklimnya kering, karena hujan akan membilas kandungan nitrogennya. Guano dapat ditemukan di berbagai negara baik di Samudera Pasifik dan samudera lainnya. Kepulauan Chinha dan Nauru di Samudera Pasifik dan Pulau Natal di Samudera Hindia merupakan tempat guano hingga kedalaman beberapa meter. Guano di Indonesia dapat ditemukan diantaranya di Sulawesi, Maluku, Kalimantan, Sumatera, Madura, Nusa Tenggara, dan Papua, dengan sentra pengolahan lebih banyak di daerah Jawa Timur.

Di Indonesia, jumlah cadangan fosfat alam yang telah diselidiki adalah 2,5 juta ton endapan guano (kadar $\text{P}_2\text{O}_5 = 0,17-43\%$). Keterdapatannya di Provinsi Nangroe Aceh Darussalam, Sumatera Utara, Kalimantan, Jawa Timur, Jawa Tengah, Jawa Barat, Sulawesi

Tengah, Sulawesi Utara, Nusa Tenggara Timur, Papua dan Papua Barat. Di Indonesia, eksplorasi fosfat dimulai sejak tahun 1919. Umumnya, kondisi endapan fosfat guano yang ada berbentuk lensa-lensa, sehingga untuk penentuan jumlah cadangan, dibuat sumur uji pada kedalaman 2-5 meter. Selanjutnya, pengambilan contoh untuk analisis kandungan fosfat. Eksplorasi rinci juga dapat dilakukan dengan pemboran apabila kondisi struktur geologi total diketahui.

3. Genesis dan Karakteristik Fosfat Alam

Genesis secara leksikal berarti terjadinya sesuatu atau awal mula sesuatu atau pembentukan. Sedangkan karakteristik artinya adalah mempunyai sifat khas sesuai dengan perwatakan tertentu. Sementara fosfat alam (*rock phosphate*) adalah nama mineral yang mengandung ion fosfat dalam struktur kimianya. Bab ini mengulas tentang ketiga hal tersebut.

3.1. Pembentukan

Endapan fosfat di alam dapat diperoleh dari batuan fosfat (*Phosphate Rock*) dengan rumus kimia $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, berwarna abu-abu, memiliki kekerasan 5 dalam skala Mohs dan Berat Jenis 3 (Permana, 1989). Menurut Catchart (1980), kurang lebih terdapat 150 mineral yang mengandung fosfat dengan kadar minimal 0,44% P. Sebagian besar deposit fosfat yang merupakan hasil tambang terdiri atas kelompok mineral apatit $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{F},\text{OH})_2$.

Dalam bidang industri pertambangan, ada dua pengertian mengenai batuan fosfat (atau fosfat alam). Jika batuan yang mengandung apatit dengan kadar P yang cukup tinggi dan dapat digunakan sebagai bahan baku pupuk atau melalui *furnace charge* dihasilkan unsur P, maka bahan ini disebut batuan fosfat. Pengertian yang lain disebut apatit terkonsentrasi. Phosphorite adalah batuan untuk sedimen yang didominasi oleh mineral apatit. Dalam pengertian ini dikenal "*Calcareous phosphorite, Sandy phosphorite, dan Clayey phosphorite*". Berdasarkan genesisnya, endapan fosfat dapat dibedakan menjadi dua jenis utama yaitu endapan primer dan endapan sekunder.

Endapan fosfat primer terjadi dari intrusi urat hidrotermal. Endapan ini sering berasosiasi dengan batuan beku alkalin yang mengandung mineral karbonat, nefelin, senit, dan piroksin (Bisri dan Permana, 1991). Endapan fosfat primer umumnya didominasi mineral fluorapatit ($\text{Ca}_3(\text{F,Cl})(\text{PO}_4)_3$), dan mineral hidroksi-fluorapatit dengan rumus umumnya adalah $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH,F}$, atau carboxy-apatit, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{CO}_3\text{OH}$. Produksi fosfat dunia yang berasal dari endapan primer berkisar 15 – 20%, terbesar kedua setelah endapan laut.

Endapan fosfat sekunder dapat dipilah atas endapan laut (*depost marin*) dan endapan guano (*cave deposit*). Mineral endapan sekunder berbentuk fosforit. Fosfat atau deposit marin merupakan endapan fosfat sedimen yang terendapkan di laut dalam, pada lingkungan alkali dan lingkungan yang tenang. Endapan laut terbentuk dari hasil penguraian berbagai kehidupan yang ada di laut, atau akibat erosi mineral-mineral yang mengandung fosfat oleh aliran sungai yang kemudian terbawa ke laut. Partikel-partikel fosfat akan menggumpal (*coagulation*) dan mengendap sebagai pellet di dasar laut. Akibat adanya peristiwa geologi, endapan akan terangkat dan membentuk daratan yang berasosiasi dengan kapur dan dolomit (Bisri dan Permana, 1991). Endapan yang terjadi seringkali mencapai areal yang sangat luas dengan ketebalan sampai puluhan meter. Oleh karena itu, produksi fosfat dunia yang berasal dari endapan laut merupakan yang terbesar atau mencapai 75-80%.

Endapan fosfat guano berasal dari sisa kotoran sejenis burung maupun bangkai binatangnya yang bereaksi dengan hasil pelapukan batuan. Lokasi endapan biasanya di pulau yang curah hujannya rendah, sehingga hampir tidak pernah terjadi erosi. Endapan fosfat gua berasal dari kotoran kelelawar yang diendapkan di dalam gua kapur. Kotoran-kotoran binatang tersebut yang mengandung asam fosfat akan bereaksi dengan batu gamping dan batuan kalsium karbonat. Reaksi yang terjadi akan membentuk kalsium fosfat (Ca-fosfat), sebagai akibat penggantian batu gamping secara metasomatis. Bila terjadi pada tanah liat yang mengandung besi dan aluminium, maka reaksi akan menghasilkan Fe-fosfat dan Al-fosfat. Produksi fosfat dunia yang berasal dari endapan guano merupakan yang terkecil (berkisar 2%). Umumnya endapan fosfat yang terdapat di Indonesia berasal dari kotoran kelelawar yang terdapat dalam gua-gua kapur, kecuali endapan fosfat di Ayamaru Sorong. Menurut schroo (1963); Siregar dkk (1987) bahwa endapan fosfat tanah yang terdapat di Ayamaru termasuk endapan marin yang bercampur dengan endapan guano. Endapan ini tidak didominasi mineral apatit tetapi mineral Krandalit ($\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5\cdot\text{H}_2\text{O}$).

Kelompok endapan fosfat marin terbentuk akibat sedimentasi bawah air tanah pada batuan sedimen dan tanah yang merupakan hasil hancuran dari mineral fosfat yang lain. Mineral fosfat sekunder dapat terbentuk akibat reaksi antara kalsium dengan mineral lainnya seperti wardite, variscite dan wavellit. Falster (1986) menemukan crystal mineral berbentuk triangular bergabung dengan wavelit dalam nodul dan veins pada batu pasir.

Berdasarkan komposisi kimia dan lingkungan pembentuknya, maka menurut Rumawas (1990), secara kimiawi endapan fosfat alam sangat bervariasi dan dapat dibedakan atas tiga kelompok besar yaitu: 1) Fe-Al-P, misalnya yang didominasi oleh mineral strengite ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), variscite ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), dan wavelit (Al_3PO_4). 2) Mineral kelompok Ca-Al-P, misalnya: mineral krandalit dengan rumus kimia adalah $(\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O})$, 3). Ca-P misalnya Fluor apatit yang banyak dijumpai adalah $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2)$.

Berdasarkan ikatan kimia antara atom-atom penyusun mineral di atas, dapat disimpulkan bahwa endapan fosfat yang didominasi oleh Al atau Fe, seperti wavelit, strengit, dan krandalit lebih stabil dibandingkan dengan apatit. Berdasarkan komposisi kimianya, maka dapat dikatakan bahwa ikatan antara fosfat dan Al lebih kuat dibandingkan dengan ikatan antara fosfat dengan Ca pada mineral Apatit. Dari ketiga kelompok mineral tersebut di atas, mineral apatit paling mudah larut, sedangkan mineral lainnya kelarutannya rendah.

3.2. Karakteristik

Karakteristik fosfat alam sangat beragam dan menentukan keefektifannya bila digunakan sebagai pupuk secara langsung maupun sebagai bahan baku pembuatan pupuk kimia. Penggunaan langsung batuan fosfat sebagai pupuk P bukan merupakan suatu konsep yang baru, baik di daerah-daerah sedang maupun di daerah-daerah tropis. Meskipun demikian penggunaan fosfat alam secara langsung saat ini lebih mendapat perhatian. Pada mulanya penggunaan batuan fosfat secara langsung nyaris tidak memungkinkan sebagai pupuk P yang direkomendasikan. Hal ini disebabkan karena timbulnya kerancuan di antara para pakar dalam menilai keefektifannya.

Menurut Fenster dan Leon (1979), sebagian besar penelitian diarahkan pada hubungan antara kehalusan zarah dan tanggapan hasil. Kebanyakan penelitian ini dilakukan dari segi kesuburan tanah dengan cara batuan fosfat diberikan dan tanggapan hasil dicatat. Cara penghampiran empiris ini mempunyai berbagai keterbatasan, bukan hanya karena adanya keragaman sifat pada berbagai jenis tanah, tetapi

juga karena terdapatnya perbedaan besar diantara sumber-sumber batuan. Hal ini menyebabkan perbedaan nyata dari percobaan ke percobaan lainnya pada satu kasus tertentu. Selain itu nilai residu dari batuan fosfat hampir tidak ditentukan karena sebagian besar percobaan dirancang hanya untuk 1-2 tahun.

McClellan (1979) beranggapan bahwa salah satu sebab melambatnya ketenaran penggunaan batuan fosfat untuk pemberian langsung ialah karena cara yang keliru dalam menyatakan tingkat kereaktifan batuan. Praktek menggunakan nisbah P_2O_5 larut untuk mutu batuan (*rock grade*) sebagai petunjuk keefektifan agronomi akan menyesatkan. Hal ini disebabkan karena jumlah apatit dalam suatu deposit berbeda nyata dari suatu tempat ke tempat lainnya. Keadaan demikian akan menghasilkan mutu batuan yang berbeda-beda. Menurut Ksawneh dan Doll (1978), pada umumnya terdapat tiga faktor penting yang mempengaruhi ketersediaan P dalam batuan fosfat, yaitu (1) perbedaan sifat bawaan (*inherent*) antar sumber batuan; (2) Lingkungan tempat batuan fosfat diberikan; dan (3) tanaman yang menggunakan pupuk batuan fosfat.

Menurut McClellan (1979), berdasarkan kumpulan mineral yang terdapat di dalam deposit maka batuan fosfat dipilah kedalam tiga klasifikasi besar yaitu: Besi Aluminium Fosfat, Kalsium-Besi-Aluminium-Fosfat, dan Kalsium Fosfat. Kalsium fosfat merupakan mineral fosfat komersial, dikenal secara kolektif sebagai batuan fosfat. Karena mempunyai satu sifat yang sama, yaitu penataan struktur dari ion-ionnya, maka kalsium fosfat merupakan kelompok terbesar dari mineral apatit. Walaupun struktur kristalnya sama, susunan apatit ini berbeda dengan Fluorapatit $Ca_{10}(PO_4)_6F_2$, yang umumnya dianggap sebagai komposisi dari batuan fosfat.

Mineral apatit terdapat dalam hampir semua bahan geologi yang kaya fosfat, yaitu deposit sedimen, metamorf, dan beku. Secara ekonomis endapan sedimen adalah yang terpenting diantara ketiganya. Hampir 85% dari tambang batuan fosfat di dunia berasal dari endapan ini. Menurut Khasawneh dan Doll (1978), akibat sifat fisik dan kimia dari batuan beku dan metamorf menyebabkan batuan ini kurang reaktif dan nyaris tidak bereaksi pada pemberian langsung. Kedua jenis batuan ini merupakan bahan kristalin kasar dan tidak memiliki permukaan dakhil (*internal surface*). Sebaliknya, di alam batuan fosfat sedimen terdiri atas agregat terpadukan lepas dari mikrokristalin yang memiliki permukaan jenis (*spesific surface*) yang nisbi luas. Susunan kimianya beragam karena terbentuk pada periode geologi yang berkisar dari masa myosin sampai prekambrium. Keadaan inilah yang menyebabkan

susunan serta kadar batuan fosfat berubah-ubah walaupun berasal dari satu tempat.

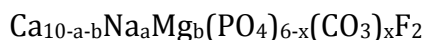
Lebih dari 25 unsur dilaporkan terdapat dalam kelompok fluorapatit yang biasanya berasal dari batuan beku (Tabel 3.1).

Tabel 3.1. Substitusi ion-ion dalam Fluor apatit

Constituent Ion	Fluor Apatit $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_4\text{F}_2$	Substituting ion
Ca^{2+}		$\text{Na}^+, \text{Sr}^{2+}, \text{Mn}^{2+}, \text{K}^+, \text{U}^{4+}$
P^{5+}		$\text{C}^{4+}, \text{S}^{6+}, \text{Si}^{4+}, \text{As}^{5+}, \text{V}^{5+}, \text{Cr}^{6+}, \text{Al}^{3+}$
F^{-1}		$\text{OH}^{-1}, \text{Cl}^{-1}, \text{F}^{-1}$
	Francolite $\text{Ca}_{10-a-b}\text{Na}_a\text{Mg}_b(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{CO}_3)_x\text{FO}_{-4x}(\text{F.OH})_2$	

Kebanyakan berada dalam jumlah tidak nyata (McClellan, 1979). Berdasarkan Table 3.1 dapat dijelaskan bahwa fluorapatit sebenarnya sangat langka dijumpai di alam dan hanya terbatas pada beberapa deposit beku. Pada umumnya akan terjadi substitusi isomorfik dalam dasar fluorapatit. Substitusi parsial ini terjadi hampir pada semua anasir ion dalam struktur fluor apatit yakni Ca^{2+} biasanya disubstitusi oleh Mg^{2+} dan Na^+ , dan sedikit oleh Sr^{2+} , Mn^{2+} , K^+ , U^{4+} , Fe^{2+} , dan beberapa logam tanah langka. Tetrahedra PO_4^{3-} sebagian besar ditukar oleh Ca^{2+} dan sebagian kecil oleh SO_4^{2-} , AsO_4^{3-} , CrO_4^{2-} , dan AlO_3^{3-} . Ion F^- diganti oleh OH^- dan Cl^- , sedangkan O_2 oleh OH^- (McClellan, 1978).

Pertukaran PO_4^{3-} tetrahedral oleh CO_3^{2-} planar akan dirangkaikan dengan pertukaran substitusi kation monovalen bagi Ca^{2+} diperlukan untuk menjaga kenetralan elektrostatis. Dalam sedimen apatit yang terbentuk dalam lingkungan laut adalah kation-kation yang biasa menggantikan Ca^{2+} adalah Na^+ , Mg^{2+} , dan K^+ . Atas dasar prinsip pertukaran tersebut maka sedimen apatit alamiah dapat dinyatakan dengan rumus:



Dimana a berkisar 0,1 hingga sekitar 0,35, b hingga 0,14, dan x hingga 1,26 mol/berat rumus. Apatit dengan susunan demikian biasanya disebut karbonat apatit atau francolite (McClellan, 1979).

Adanya substitusi CO_3^{2-} untuk PO_4^{3-} mempengaruhi struktur kristal, kemantapan fisik dan kimia dari apatit (Kasawneh dan Doll, 1978). Pengaruh pada struktur kristalin adalah berkurangnya ukuran kristal

dan dengan demikian bertambahnya luas permukaan jenis agregat apatit.

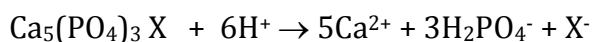
Tabel 3.2. Beberapa Sifat Mineral Apatit dan Krandalit

No.	Sifat-sifat terpilih	Mineral Apatit	Mineral Krandalit
1.	Formula	$X_5Y(PO_4)_3$	$CaAl_3(PO_4)_2.(OH)_5.H_2O$
2.	P ₂ O ₅ -total	32.0 - 35.0	28%
3.	CaO-total	48 - 52	12-16%
4.	Silika (%)	2.0 - 5.0	2,40
5.	Fluorida (%)	<4.0	0,04
6.	Sulfat (%)	0,70 - 1,90	td
7.	Besi (%)	<1.0	15,80
8.	Aluminium (%)	2.0	25,10
9.	Khlorida terlarut (%)	0,05	td
10.	K ₂ O (%)	0.3	0,50
11.	MgO (%)	0.5	0,80

Walaupun sumber batuan fosfat dan bentuk fisiknya adalah penting, keefektifannya dalam tanah sebagian besar ditentukan oleh 3 faktor yaitu pH, kadar P, dan Ca dalam larutan tanah. Apabila aras dari salah satu faktor ini tidak menimbulkan pelarutan batuan fosfat, maka dapat menyebabkan batuan fosfat menjadi tidak mempan.

Kemasaman tanah diidentifikasi sebagai faktor tanah terpenting yang mempengaruhi ketersediaan P dari batuan fosfat. Keefektifan Agronomi dari batuan fosfat menjadi tinggi pada tanah-tanah masam dari pada tanah netral atau alkalin. Hubungan ini dianggap sebagai pengaruh pH, yang mana kemasaman adalah pelaku yang bertanggung jawab bagi peningkatan ketersediaan fosfor.

Kondisi pH yang rendah meningkatkan kelarutan batuan fosfat karena tersedianya H⁺ bagi pemasamannya. Reaksi sederhana dari Fluorapatit dalam lingkungan masam digambarkan oleh Kobala-Rosand dan Wild (1982) sebagai berikut:



Jika X adalah OH⁻ atau CO₃²⁺ maka dalam reaksi ini dibutuhkan lebih banyak proton. Jika X adalah Fluor, maka ion F⁻ bebas bersaing dengan H₂PO₄⁻ terhadap tapak jerapan pada permukaan koloid tanah. Pada aras pH rendah apatit tipe francolite agak tidak mantap dan akan membebaskan P yang bereaksi dengan Al, dan Fe yang lebih mantap dari apatit. Dari segi praktis, pH tanah rendah terbentuk bersama kondisi

tanah lainnya yang juga mempengaruhi batuan fosfat, seperti Ca tertukarkan yang rendah dan Al tertukarkan yang tinggi (Khasawneh dan Doll, 1978).

Afinitas (daya semat) tanah terhadap Ca akan menimbulkan pelarutan batuan fosfat karena menyebabkan terikatnya Ca yang dibebaskan dari pelarutan mineral apatit. Untuk fluor apatit, 10 mol Ca terlarut untuk setiap 6 mol P yang masuk ke dalam larutan. Afinitas tanah yang rendah terhadap Ca akan meningkatkan aras larutan Ca pada permukaan apatit; akibatnya, aras $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$ menurun mengikuti prinsip hasil kali kelarutan. Landaian (gradien) $\text{H}_2\text{PO}_4^-/\text{HPO}_4^{2-}$ antar permukaan apatit dan larutan tanah juga menurun dan proses pelarutan batuan fosfat melambat (Khasawneh dan Doll, 1978). Afinitas tanah terhadap Ca akan tinggi bila persentase kejenuhan Ca rendah. Keadaan ini biasanya timbul bila semua persentase kejenuhan basa dan pH rendah.

Aras P tanah yang dinyatakan dengan aktivitas H_2PO_4^- atau dengan, $\text{pH}_2\text{PO}_4 + 1/2\text{pCa}$, memegang peranan dalam pelarutan batuan fosfat, analogi dengan yang diperankan oleh aras Ca^{2+} . Matriks tanah harus menimbulkan suatu landaian positif dalam potensial kimia-elektro dari Ca^{2+} dan H_2PO_4^- agar menjamin pelarutan batuan fosfat. Jika tanah sangat terjenuhkan oleh apatit dari batuan fosfat, maka batuan tidak akan melarut dan juga tidak nyata turut dalam pemasokan P pada akar tanaman. Menurut Smyth dan Sanchez (1982), pengaturan aras P yang rendah dalam larutan tanah dianggap merupakan kakas penggerak (*driving force*) penting bagi pelarutan batuan fosfat. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa kapasitas serapan (*sorption capacity*) tertinggi pada tanah-tanah masam yang disebabkan oleh kadar liat (terutama kaolinit) dan Fe_2O_3 bebas yang tinggi memungkinkan pelarutan dan ketersediaan P dari batuan fosfat.

Dari segi praktis, kesuburan tanah sedang dengan kadar P dalam larutan tanah nisbi tinggi akan sedikit atau tidak berpengaruh oleh pemberian batuan fosfat. Sebagai pupuk P yang mempan, batuan fosfat hanya terbatas pada tanah-tanah yang kahat P sangat tinggi hingga sedang, dan kelarutannya sangat sedikit atau tidak bermakna pada tanah-tanah yang status P-nya cukup tinggi.

Faktor-faktor tanah lainnya yang turut berperan bagi ketersediaan P dalam batuan fosfat ialah tekstur tanah, bahan organik, dan cara penempatan pupuk P. Tekstur tanah secara tidak langsung menggabungkan pengaruh dari liat tanah atas hubungannya dengan KTK, pH dan atas kemampuan tanah dalam memfiksasi P. Tanah-tanah bertekstur ringan dan pasiran tergolong tidak baik bagi pengikatan P dan Ca, sehingga P dapat terlindi ke bawah daerah perakaran. Pada

kondisi ini batuan fosfat memberikan keuntungan karena kelarutan rendah dibandingkan dengan pupuk TSP

Pengaruh bahan organik berkaitan dengan daya semat Ca dan pengendapan. Selain itu, P inorganik yang bersumber dari batuan fosfat dapat terikat pada kutub organik P tanah yang selanjutnya oleh tanaman, P diperoleh melalui mineralisasi. Bahan organik tanah memiliki gugus-gugus fungsional yang sangat reaktif yakni $-COOH$, $-OH$ (fenolik, alkoholik), quinon, eter, dan lain-lain yang biasanya bergandengan dalam berbagai kombinasi senyawa. Kombinasi penggandengannya atau posisi relatif gugus fungsional pada asam-asam organik sangat penting dalam hubungannya dengan penetralan keracunan Al bagi tanaman (Sanchez, 1976).

Pemberian fosfat alam yang berkadar Al tinggi pada tanah masam harus dikombinasikan dengan penambahan bahan organik. Hasil penelitian Musaad (2003) menunjukkan bahwa pemberian endapan fosfat Ayamaru yang diperkaya dengan pupuk kandang pada tanah mineral masam lebih efektif dan menguntungkan dibandingkan dengan tanpa pengayaman dengan bahan organik. Apabila bahan organik yang kaya fosfat ditambahkan ke dalam tanah akan terjadi pelepasan P. Sebaliknya akan terjadi pengambilan fosfat di dalam tanah apabila bahan organik yang ditambahkan miskin fosfat. Pemberian fosfat alam yang disertai penambahan bahan organik akan lebih meningkatkan kelarutan P melalui pembentukan fosfo-humus yang lebih mudah dimanfaatkan oleh tanaman (Tisdale *et al.*, 1984). Menurut Lopez-Hernandez (1979) yang dikutip oleh Montulalu (1996), bahwa pelepasan fosfat oleh anion-anion organik pada tanah-tanah masam kemungkinan disebabkan oleh: (1) Persaingan langsung antara anion fosfat pada tapak jerapan, (2) terlarutnya serta terkelatnya Fe, Al, dan Mn aktif, dan 3) terjadinya hidrolisis asam-asam organik.

Hampir semua penelitian batuan fosfat dilaporkan menggunakan satu metode pemberian, yaitu dengan cara menebarkan (*broadcasting*) bahan yang digerus halus dan dicampur merata dalam daerah perakaran. Cara yang sama juga dilakukan dalam penelitian pot di rumah kaca. Cara penempatan ini dianggap paling sesuai, karena memungkinkan batuan fosfat teragih lebih luas dalam mintakat perakaran sehingga menimbulkan singgungan yang besar antara zarah batuan fosfat dan perakaran tanaman (Ksawneh dan Doll, 1978).

Perbedaan di antara tanaman dalam kemampuannya menggunakan P dari batuan fosfat perlu diperhitungkan. Perbedaan ini dapat berkaitan dengan perbedaan dalam pola penggunaan P dan Ca,

perbedaan dalam pengaruhnya atas pH tanah, dan perluasan sistem akar (Ksawneh dan Doll, 1978).

Suatu parameter dalam menggunakan batuan fosfat ialah laju pertumbuhan nisbi dari suatu spesies tanaman dan pengaruhnya atas pola penggunaan Ca dan P. Tanaman yang tumbuhnya cepat membutuhkan laju pelonggokan P yang tinggi dalam tanaman guna mengatur laju pertumbuhan ini. Jika tanaman mempunyai sistem perakaran luas, maka kebutuhan P perunit panjang akar akan berkurang dibandingkan dengan sistem perakaran yang panjang dan luasnya terbatas. Bagi suatu aras pengambilan P perunit panjang akar, maka kadar P dalam larutan tanah dibutuhkan di atas nilai tertentu yang ditentukan oleh kinetika pengambilan P dari spesies tanaman. Jika fosfat alam tidak mengatur kadar demikian di dalam larutan tanah, maka laju serapan P per unit akar akan menurun dan dengan demikian pertumbuhan nisbi dari akar menurun pula.

Penggunaan tanaman yang tenggang fosfat rendah dapat membantu penggunaan batuan fosfat yang berkelarutan rendah menjadi lebih intensif. Pada umumnya sifat ini ditemukan bersamaan dengan sifat tenggang Aluminium. Hal ini disebabkan karena sifat tenggang P rendah tampaknya berasosiasi dengan kemampuan tanaman dalam menyerap dan mengalih tempatkan dari akar ke pupuk (Sanchez, 1981). Fox et al., 1974 yang dikutip oleh Sanchez, 1976, melaporkan bahwa adanya suatu kadar optimum dari P dalam larutan tanah yang berkorelasi dengan pertumbuhan yang baik serta beragam menurut spesies tanaman. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa ubijalar lebih tenggang pada aras P dalam larutan tanah rendah dari pada Lettuce. Sedangkan jagung dan sawi berada pada posisi peralihan.

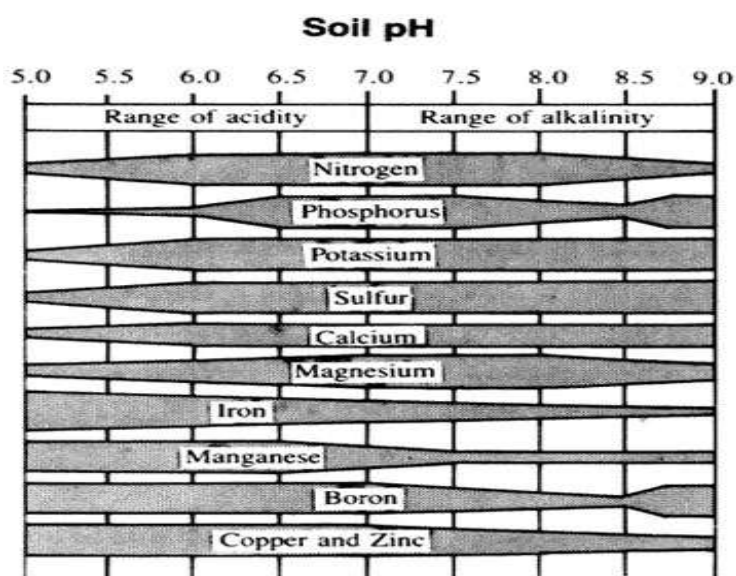
3.3. Dinamika Fosfor

Kandungan fosfor dalam batuan sangat penting dalam menentukan kadar P tanah. Fosfor merupakan unsur hara terpenting, menempati urutan kedua setelah nitrogen. Secara umum P di dalam tanah dipisahkan menjadi dua bentuk yaitu bentuk P-organik dan P-anorganik. Jumlah kedua bentuk ini disebut sebagai P-total. Bentuk P yang tersedia bagi tanaman hanya merupakan sebagian kecil dari jumlah yang ada. Keberadaan P di dalam tanah bersifat dinamis karena dipengaruhi oleh berbagai anasir pembentuk tanah dan mekanisme reaksi-reaksi yang sangat kompleks.

Menurut Stevenson (1981), P dihasilkan melalui proses pembentukan tanah, bersumber dari batuan yang didominasi mineral apatit. Selama pembentukan dan perkembangan tanah, P-apatit

dibebaskan sehingga mengalami berbagai transformasi melalui berbagai proses-proses sebagai berikut: (1) Diabsorpsi tanaman dan terdekomposisi kembali melalui aktivitas mikroorganisme dan mineralisasi, (2) Berikatan dengan bahan organik tanah, dan (3) Mengendap kembali dalam bentuk sukar larut dengan oksida dan hidroksida besi serta aluminium.

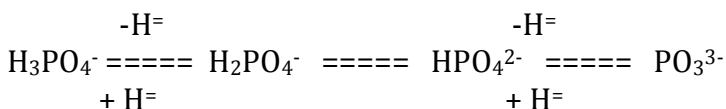
Tanaman menyerap P terutama dalam bentuk ion orthofosfat primer (H_2PO_4^-) dan ion orthofosfat sekunder (HPO_4^{2-}). Kadar kedua ion ini dalam larutan tanah sangat rendah, kadar rerata 0,05 ppm (Barber, 1984). Kadar P-total di litosfer berkisar 1200 ppm, dan di dalam tanah mencapai 200 – 500 ppm P_2O_5 (Lindsay, 1979). Sebagian besar P dalam bentuk ion orthofosfat membentuk kompleks dengan ion Ca, Fe, Al serta mineral-mineral silikat. Terdapat beberapa mineral sekunder yang mengandung P, seperti wavelit, vivianit, strengit, dufrenit, dan krandalit. Selain itu P di alam juga berbentuk gas PH_3 di danau atau di rawa pada kondisi reduksi. Bentuk-bentuk P dalam larutan tanah bervariasi dan bergantung pada pH. Ketersediaan fosfat dan penyematannya dalam hubungannya dengan pH, dikemukakan oleh Brady (1974) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1. Barber (1984) dan Schmitt (1998) mengemukakan bahwa fosfat dalam bentuk ion H_2PO_4^- lebih tersedia pada lingkungan yang lebih masam. Pada kondisi netral didominasi oleh ion H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} , sedangkan bila kondisi alkalis bentuk ion fosfat ini cenderung berfungsi sebagai proton pendisosiasi asam (H^+) dan berubah menjadi HPO_4^{2-} .



Gambar 3.1. Hubungan Antara pH dengan ketersediaan hara

Pengetahuan tentang perubahan ion P dalam tanah sangat penting dalam pengelolaan pupuk P pada tanah. Hubungan antara bentuk-bentuk ion fosfat dan pH media dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut.

Hubungan antara bentuk-bentuk ion fosfat dan pH media dapat digambarkan secara sederhana sebagai berikut.



Berdasarkan diagram ini menunjukkan bahwa dinamika P pada tanah sangat ditentukan oleh pH media. Bila pemberian fosfat alam pada tanah dengan kisaran pH 6,5 – 7,0 maka bentuk ion P yang dominan adalah H_2PO_4^- dan HPO_4^{2-} (Tan,1982).

3.4. Fraksi Organik dan Interaksinya

Secara sederhana bahan organik dibagi menjadi (1) senyawa-senyawa substansi humus yang merupakan serangkaian senyawa dengan berat molekul yang tinggi. Substansi ini biasanya berwarna coklat sampai kehitaman, meliputi asam humat, asam fulvat, asam-asam organik lainnya, hematomelanat dan kelompok humin. (2) substansi bukan humus yaitu karbohidrat, protein, peptida, asam-asam amino, asam nukleat, purin, pirimidin, asam lemak, lilin, resin, zat warna, dan substansi-substansi organik lainnya yang mempunyai berat molekul rendah (Stevenson, 1982; Schnitzer, 1991). Penelitian-penelitian dengan NMR (*nuclear magnetic resonance*) dan *pyrolysis gas chromatography-mass spectroscopy* menemukan bahwa kandungan dalam konstituen-konstituen aromatik dalam berbagai bahan organik tanah lebih rendah dari yang terukur pada penelitian dengan cara peruraian kimia (Joetono, 1994).

Bahan organik tanah memiliki gugus-gugus fungsional yang sangat reaktif yakni gugus karboksilat $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$ (fenolik, alkoholik, quinon, eter dan lain-lain) yang biasanya saling berikatan dalam berbagai kombinasi. Kombinasi ikatannya atau posisi relatif gugus fungsional di dalam asam-asam organik sangat penting artinya dalam hubungannya dengan penetralan keracunan Al dan Fe bagi tanaman (Sanchez, 1992). Menurut Stevenson (1982), gugus $-\text{COOH}$ dan $-\text{OH}$ merupakan gugus fungsional utama asam organik yang terlibat dalam reaksi ion logam dengan asam-asam organik tersebut.

Bahan organik berpengaruh positif terhadap kekhilangan tanah yaitu sebagai sumber hara bagi pertumbuhan tanaman, meningkatkan KTK tanah, dan secara biologis mempengaruhi aktivitas mikroba tanah sehingga berdampak positif bagi lingkungan tanah. Berdasarkan segi fisika, bahan organik berpengaruh terhadap struktur tanah, aerasi, retensi air dan pengelolaan tanah. Secara tidak langsung humus tanah mempengaruhi penyerapan herbisida dan bahan kimia pertanian lainnya (Saidi, 2018).

Apabila bahan organik yang kaya fosfat ditambahkan ke dalam tanah akan terjadi pelepasan P. Hal ini disebabkan karena senyawa organik memiliki gugus-gugus fungsional yang bermuatan negatif menjadi ion pesaing dengan fosfat terhadap jerapan atau fiksasi oleh permukaan mineral liat bermuatan positif atau membentuk kompleks dengan kation polifalen sehingga fosfat terbebaskan. Sebaliknya akan terjadi pengambilan fosfat di dalam tanah apabila bahan organik yang ditambahkan miskin fosfat. Pemberian bahan organik dapat meningkatkan kelarutan P di dalam tanah melalui pembentukan fosfohumus yang lebih mudah dimanfaatkan oleh tanaman (Tisdale *et al.*, 1990)

Selanjutnya dikatakan bahwa akan terjadi pertukaran ion fosfat dari tapak jerapan oleh anion humat dan terbentuknya kompleks humus dengan ion-ion logam seperti Al, Fe dan Mn. Menurut Tan (1993), bahwa pelepasan fosfat oleh anion-anion organik pada tanah-tanah masam kemungkinan disebabkan oleh: (1) Persaingan langsung antara anion fosfat pada tapak jerapan, (2) terlarutnya serta terkhelatnya Fe, Al, dan Mn aktif, dan (3) terjadinya hidrolisa asam-asam organik seperti asam humat dan asam fulvat.

Pemupukan fosfat sering tidak efisien karena fosfat terikat menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman. Dari berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa kurang lebih 10-30 persen saja dari pupuk P yang diberikan ke tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Hal ini disebabkan karena adanya proses fiksasi yang kuat dari mineral liat serta ion-ion Al, Fe terhadap P larutan yang bersumber dari pupuk yang diberikan. Salah satu cara untuk meningkatkan kelarutan P dan mengurangi fiksasi oleh mineral liat serta ion-ion Al dan Fe dapat dilakukan dengan pemberian bahan organik baik dalam bentuk padat maupun setelah difraksionasi.

Hasil fraksionasi bahan organik terdiri atas berbagai fraksi yang mengandung berbagai senyawa organik. Beberapa fraksi bahan organik yang telah diketahui berperan penting bagi kekhilangan tanah dan pertumbuhan tanaman adalah fraksi humat dan fulvat. Asam fulvat

merupakan bahan yang berwarna gelap di dalam larutan setelah fraksi humat dipisahkan melalui asidifikasi. Beberapa tahun terakhir ini asam fulvat diketahui sangat bermanfaat sebagai antibiotik. Asam fulvat juga sudah diketahui sebagai elektrolit organik alami yang dapat menyeimbangkan dan menyumbang energi secara biologi di dalam sel (Williams, 2000). Asam fulvat juga pada kondisi tertentu dapat berfungsi sebagai donor elektron maupun akseptor elektron sebagai dasar dalam keseimbangan sel. Asam fulvat dan asam humat berperan dalam meningkatkan laju fotosintesis tanaman, menetralkan pH tanah, meningkatkan kesuburan tanah, merangsang perkembangan mikroba tanah antagonis dan mengurangi serangan patogen (Hersanti *et al.*, 2002). Selain asam humat dan asam fulvat, fraksi bahan organik juga mengandung asam-asam organik dari golongan karboksilat seperti asam asetat, malat, suksinat, propionat, dan sitrat.

Hasil akhir dekomposisi bahan organik berupa humus sangat berperan penting bagi kesehatan tanah terutama berkaitan dengan ketersediaan hara bagi tanaman baik yang berkaitan dengan kelarutan P maupun hara lainnya seperti N, dan S. Secara umum dari segi agronomi, fraksi bahan organik tanah berperan dalam perkecambahan biji, pertumbuhan akar, penyerapan unsur hara dan pengaruh fisiologis lainnya pada tanaman (Rao, 1994). Selanjutnya dikatakan bahwa mobilisasi N, P dan K dari tanah ke sistem perakaran meningkat dengan adanya bahan-bahan humus. Penyerapan unsur mikro juga meningkat dengan adanya penambahan humat karena humat dikenal sangat efektif dapat membentuk kelat dengan unsur-unsur mikro terutama Fe. Kombinasi antara asam fulvat dan Fe diketahui lebih efektif dalam meningkatkan pembentukan perakaran lateral pada tanaman dibandingkan Fe saja (Waisel *et al.*, 1991).

Sifat-sifat kimia dan koloidal bahan organik tanah dapat dikaji hanya apabila komponen penyusun bahan organik dapat dipisahkan dari komponen anorganik tanah (Stevenson, 1994). Banyak prosedur telah dikembangkan untuk memisahkan fraksi bahan organik tanah dengan menggunakan pelarut asam dan basa. Ciri dasar dari fraksionasi bahan organik adalah pada kondisi alkalin, asam humat dan asam-asam organik lainnya membentuk ikatan yang sangat kuat, sedangkan pada kondisi masam, asam-asam organik tersebut terbebaskan, sebagian mengendap dan bergantung pada sifat-sifat fisik dan kimia yang spesifik.

Selama proses dekomposisi bahan organik, substansi organik mengalami pemecahannya (peruraian) yang selektif oleh mikroba. Selama peruraian berlangsung akan terjadi perubahan-perubahan yang mencolok dari susunan bahan organik aslinya. Jaringan tumbuhan

mengandung selulosa, hemiselulosa, lignin, protein, lemak, zat lilin dan zat lainnya. Ekstrak organik tanah merupakan istilah khusus yang digunakan untuk bahan yang tidak hidup, memiliki campuran yang beragam sebagai hasil transformasi dan perombakan yang dilakukan oleh mikroba terhadap jaringan organik. Proses transformasi sisa bahan organik tersebut dikenal dengan proses humifikasi yang akan menghasilkan humus dan bahan-bahan yang tahan terhadap perombakan oleh mikroba (Stevenson, 1982).

Menurut Hayes (1984), komposisi humus terdiri atas berbagai senyawa aromatik, senyawa-senyawa hidrokarbon alifatik, karbohidrat dan peptida. Humus merupakan campuran bermacam-macam senyawa organik, tetapi hanya ada dua kelompok yang mendominasi yaitu asam humat dan polisakarida. Asam humat memiliki daya tahan yang tinggi terhadap biodegradasi dalam tanah. Dengan demikian bahan humat sangat penting dalam pengelolaan tanah. Jika tanah tanpa humat, agregat akan mudah terdispersi dan tanah peka terhadap bahaya erosi (Stevenson, 1982).

Pemberian bahan organik ke dalam tanah juga telah banyak dilaporkan mampu membebaskan P yang terjerap dalam tanah sehingga P dapat tersedia bagi tanaman dan mengurangi dampak toksisitas Al dan Fe. Kemampuan bahan organik membebaskan P sangat ditentukan oleh beberapa faktor diantaranya adalah kualitas bahan organik. Bahan organik dapat melepaskan ikatan P dalam tanah melalui tiga mekanisme yaitu peningkatan pH tanah, pelepasan kation-kation seperti Ca, Mg, K yang dapat menurunkan aktivitas aluminium, dan melalui pelepasan asam-asam organik yang mampu mengkelat Al dan Fe (Bell dan Bessho, 1993).

Kwong dan Huang (1979) melaporkan bahwa asam-asam organik bereaksi dengan aluminium melalui perubahan struktur, mendorong terjadinya perubahan spesifik struktur koloid sehingga meningkatkan muatan negatif permukaannya dan menurunkan aktivitas pengikatan ion fosfat. Kestabilan kompleks dengan Al tersebut mengikuti urutan sitrat > malat > aspartat > hidroksi benzoat. Kestabilan kompleks Al-ligan organik tersebut juga dilaporkan oleh Traina *et al.*, (1986) dengan urutan asam sitrat > tartrat > format. Hasil penelitian Earl *et al.* (1979) menunjukkan bahwa dengan ketidakhadiran anion organik, Fe mengikat P dalam jumlah yang sangat banyak. Asam sitrat mengikat Fe lebih banyak dibandingkan asam tartrat dan berbeda tidak nyata dengan ikatannya terhadap Al. Perbedaan sifat-sifat ini memberikan peluang pemanfaatan fraksi organik untuk mengurangi fiksasi P oleh Al dan Fe yang bersumber dari TEFK jika diaplikasikan ke tanaman.

Hasil ekstraksi TEFK termal dengan asam klorida menyebabkan ion Al dan Fe yang bersumber dari mineral krandalit dan oksida-oksida Al dan Fe bereaksi dengan Cl^- membentuk AlCl_3 dan FeCl_3 . Pemberian fraksi bahan organik menyebabkan asam-asam organik bereaksi dengan spesies senyawa Al dan Fe membentuk Al-kelat dan Fe-kelat. Mekanisme ini secara sederhana dapat ditunjukkan oleh reaksi antara asam sitrat dengan spesies FeCl_3 (Traina et., al,1986).

Asam sitrat membentuk senyawa kelat dengan Fe sehingga Fe lebih stabil. Mekanisme pembebasan orthofosfat yang terikat Fe atau Al oleh asam-asam organik juga terjadi melalui pembentukan senyawa kompleks logam-organik. Asam sitrat dan asam oksalat memiliki kemampuan membebaskan P dari P-terjerap lebih tinggi dibandingkan dengan asam-asam organik lainnya. Hal ini diduga berkaitan dengan kestabilan yang tinggi dari senyawa sitrat-logam. Hue *et al.*, (1986) melaporkan bahwa konstante kestabilan asam sitrat-Al sebesar 12,26 dan asam sitrat-Ca sebesar 3,09. Menurut Bolan *et al.* (1994) bahwa urutan kekuatan pembebasan P oleh asam-asam organik dari yang paling kuat adalah trikarboksilat (asam sitrat), dikarboksilat (oksalat, malat, tartrat), dan monokarboksilat (asetat, format dan laktat).

3.5. Status Al dan Fe Pada Tanah Mineral

Lebih dari sebagian unsur-unsur atau kurang lebih 52 unsur dalam Tabel Berkala terdapat di dalam jaringan tanaman, tetapi hanya 17 dari unsur-unsur tersebut yang telah diketahui sebagai unsur esensial bagi semua jenis tanaman (Asher, 1991). Sehwaz (1974) menemukan tujuh unsur jarang yang esensial bagi hewan yaitu F, Si, V, Cr, Ni, Se, dan Sn. Unsur-unsur yang esensial bagi hewan, mungkin dalam waktu tertentu akan diketahui juga esensial bagi tanaman. Menurut Marschner (1986), unsur-unsur yang berpengaruh terhadap pertumbuhan tanaman tetapi tidak termasuk unsur esensial atau esensial hanya untuk tanaman tertentu pada kondisi tertentu misalnya Na, Si, dan Ce termasuk unsur bermanfaat (*beneficial element*).

Aluminium merupakan salah satu unsur penyusun kerak bumi yang jumlahnya berkisar 15% Al_2O_3 (Mengel dan Kirkby,1987). Aluminium di dalam tanah merupakan penyusun utama struktur mineral liat bersama silikon yang menempati lapisan oktahedral. Kelarutan aluminium pada tanah-tanah bereaksi netral sampai alkali sangat rendah, sedangkan pada tanah-tanah masam sangat tinggi. Aluminium dilepaskan ke dalam larutan tanah dan mengalami transformasi melalui reaksi-reaksi kimia dan biologis selama pelapukan mineral di lingkungan. Sedikit lebih mudah larut selama proses

pelapukan dibandingkan Al sehingga Al sebagian besar akan terakumulasi dalam bentuk oksida dan hidroksida.

Selain bentuk oksida dan hidroksida pada tanah-tanah mineral masam misalnya Ultisols, Al juga berada dalam bentuk ion yang dapat dipertukarkan, yaitu Al yang teradsorpsi secara tidak spesifik pada situs muatan negatif mineral liat dan hidroksida (oksida hidrat) Fe, Al dan Mn (Uehara dan Gilman, 1981). Aluminium di dalam tanah dapat berupa mineral oksida dan hidroksida, bentuk mineral primer dan sekunder yang dapat larut dan membebaskan ion-ion penyusunnya ke larutan tanah (Ritchie, 1989). Kelarutan Al selama proses pelapukan sangat bergantung pada pH. Hampir semua mineral silika merupakan sumber Al. Bentuk-bentuk ion Al dalam tanah terdiri atas Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_4^{2+}$, $\text{Al}_4(\text{OH})_{10}^{2+}$, dan $\text{Al}_6(\text{OH})_{12}^{6+}$ (Tan, 1991).

Perilaku Al yang menarik adalah (i) dapat terakumulasi dalam jaringan tanaman tertentu dan tanaman tersebut menjadi toleran terhadap konsentrasi Al yang tinggi, (ii) berdampak toksik bagi tanaman bila terlarut sebagai ion dalam larutan tanah (Asher, 1991). Konsentrasi aluminium dalam jaringan tanaman dapat mencapai 200 mg kg^{-1} (Mengel dan Kirkby, 1987). Spesies Al dalam tanah dapat berupa: (1) *micro-particulate* dalam mineral 1 : 1, mineral oksidasi-hidroksi aluminium, yang terikat pada koloid bahan organik, (2) Al polimer, (3) Al yang membentuk kompleks dengan bahan organik, dan (4) Al-monomer (Menzies *et al.*, 1992). Konsentrasi spesies-spesies aluminium tersebut sangat bergantung pada pH tanah. Mekanisme yang mengendalikan sebaran dan perilaku aluminium di antara fase padat dan larutan tanah sangat dibutuhkan untuk dapat mengidentifikasi tanah-tanah yang bermasalah toksisitas Al dan untuk menentukan pengelolaan yang tepat.

Besi merupakan unsur keempat yang jumlahnya terbanyak ditemui di kulit bumi, mencapai sekitar 5 persen dari berat keseluruhan kulit bumi (Mengel dan Kirkby, 1987). Besi bersumber dari mineral-mineral primer seperti feromagnesium silikat yang meliputi mineral olivin, augit, horblende dan biotit. Mineral-mineral yang mengandung besi umumnya berasal dari batuan beku. Oksida besi yang umumnya terdapat dalam tanah berupa hematit (Fe_2O_3), Ilmenit (FeTiO_3), magnetit (Fe_3O_4) dan siderit (FeCO_3). Besi juga terdapat dalam kisi-kisi mineral sekunder seperti mineral monmorilonit dan kaolinit (Tan, 1993).

Oksida besi atau sering disebut besi bebas merupakan istilah untuk semua bentuk senyawa besi dalam sistem $\text{Fe}_3\text{O}_2\text{-H}_2\text{O}$ yang dikandung hampir setiap jenis tanah, baik yang baru terbentuk maupun yang sudah

berkembang lanjut (Sutanto, 2000). Pada kebanyakan tanah, oksida besi dijumpai dalam konsentrasi yang rendah karena sebagian besar berbentuk mineral sekunder. Oksida besi mungkin terdistribusi secara tidak beraturan dalam profil tanah, tetapi sering kali terkonsentrasi pada horison tertentu seperti konkresi, nodul, cadas olah, horison spodik (Sutanto, 2000). Permukaan oksida berbentuk hidroksi sehingga disebut sebagai hidroksida. Bentuk hidroksida dengan luas permukaan spesifik tinggi merupakan kompleks penjerap yang sangat reaktif terhadap bermacam-macam bentuk bahan kimia pertanian dan merupakan komponen yang sangat penting dalam lingkungan tanah.

Oksida besi sangat stabil terhadap pelapukan sehingga besi umumnya terakumulasi sebagai hidroksida dalam fraksi liat. Oksida besi bersama oksida aluminium umumnya dijumpai pada tanah-tanah berpelapukan lanjut yang didominasi mineral kaolinit. Menurut Chen dan Barak (1982), kelarutan oksida dan hidroksida besi berdasarkan urutan: $\text{Fe}(\text{OH})_3$ amorphous > $\text{Fe}(\text{OH})_3$ di dalam tanah > γ - Fe_2O_3 maghaemit > γ - FeOOH lepidocrocit > α - Fe_2O_3 hematit > α - FeOOH goetit.

Konsentrasi besi di dalam larutan tanah sangat rendah dibandingkan dengan konsentrasi total besi. Besi dapat larut dalam bentuk Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, FeOH^{2+} dan Fe^{2+} . Kelarutan besi di dalam tanah sangat ditentukan oleh Fe^{3+} . Beberapa faktor yang sangat berpengaruh terhadap kelarutan besi adalah hidrolisis, pH, agen pembentuk kelat dan potensial redoks. Pada pH lebih kecil dari 7, Fe dalam bentuk senyawa $\text{Fe}_2(\text{OH})_2^{4+}$, Fe^{3+} , $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$, sedangkan pada pH lebih besar dari 7, besi dalam bentuk $\text{Fe}(\text{OH})_3^0$ atau $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ (Sechwab dan Lindsay, 1989).

Besi berperan penting dalam berbagai reaksi enzimatik metabolisme jasad hidup (Marschner, 1986; Mengel dan Kirkby, 1987), reaksi reduksi oksidasi, pH, muatan tanah, pembentukan komponen fraksi liat, dan jembatan elektrostatis pada proses agregasi tanah (Oades, 1986). Besi diserap akar tanaman dalam bentuk ion Fe^{2+} dan Fe^{3+} . Konsentrasi Fe di dalam daun tanaman berkisar 10-1000 mg kg^{-1} berat kering tanaman dengan konsentrasi kecukupan 50 – 75 mg kg^{-1} , meskipun total Fe tanaman tidak berkaitan dengan tingkat kecukupan (Jones *et al.*, 1991). Konsentrasi dan kemampuan serapan Fe sangat tergantung pada spesies, umur dan status hara lainnya di dalam tanaman.

Defisiensi dan keracunan Fe pada tanaman ditentukan oleh (1) kemampuan akar mengoksidasi atau mereduksi besi, (2) laju transpirasi, (3) konsentrasi Fe dalam larutan tanah dan (4) status hara

tanaman (Backiser *et al.*, 1984). Besi di dalam tanah dan tanaman membentuk kompleks organik atau senyawa kelat. Besi pada Ultisols umumnya dalam bentuk Fe^{2+} terkompleks dengan polifenol, asam-asam alifatik, serta asam humat dan fulvat dari bahan organik tanah. Kompleks Fe disebut sideropor dan merupakan Fe yang tersedia di dalam tanah (Mengel dan Kirkby, 1987). Pengekstrak yang umumnya digunakan untuk menganalisis kelarutan Fe adalah NH_4 -asetat, pH 4,8 dan DTPA (Dietyl Triamin Penta Acetic Acid). Defisiensi Fe pada tanah umumnya terjadi jika konsentrasi Fe terekstrak NH_4 -asetat, pH 4.8 lebih kecil dari 2 mg kg^{-1} atau terekstrak DTPA- CCl_2 pada pH 7,3 lebih kecil dari 5 mg kg^{-1} (Doberman, 2000).

Besi sangat berperan dalam sintesis ferrodoksin protein dan dibutuhkan untuk reduksi nitrat dan sulfat, asimilasi N_2 serta produksi energi (NADP). Besi berperan juga sebagai katalis atau bagian dari sistem enzim yang berasosiasi dalam pembentukan khloropil. Besi sebagai komponen enzim dalam redoks seperti peroksidase, katalase dan oksidase (transport elektron) dan sitokhrom (tahap akhir respirasi) serta berfungsi dalam pertumbuhan meristem akar (Jones *et al.*, 2001). Dalam khromoprotein ribosom terdapat kurang lebih 20% Fe. Defisiensi Fe menyebabkan menurunnya aktivitas katalase, peroksidase dan peroksidase askorbat serta meningkatnya aktivitas dan jumlah dismutase superoksida, akumulasi radikal anionsuperoksida dan peroksida pada daun muda (Tewari *et al.*, 2007). Gejala defisiensi Fe ditandai dengan khlorosis pada daun muda, dan bila semakin parah khlorosis juga dapat terjadi pada daun tua. Disamping itu proses fotosintesis terhambat sehingga menurunkan produksi bobot kering tanaman secara drastis. Jika terjadi kelebihan Fe hingga beberapa ratus mg kg^{-1} , maka Fe akan terakumulasi tanpa adanya gejala toksik. Toksisitas Fe pada tanaman tertentu dapat terjadi dengan adanya gejala spot berwarna coklat pada daun (Syukur, 1995).

4. Fosfat Alam Ayamaru

Fosfat alam yang umumnya merupakan batuan fosfat terbentuk secara alami dan didominasi mineral yang berkadar fosfat tinggi. Ayamaru adalah daerah di Papua Barat yang memiliki potensi fosfat alam yang khas. Bab ini menyampaikan potensi tersebut.

4.1. Tanah Ayamaru

Berdasarkan letak geografis daerah Ayamaru terletak di sebelah selatan daerah kepala burung Kabupaten Maybrat, Papua Barat. Tanah di daerah ini telah dipetakan oleh Reynders dan Schultz (1958). Daerah yang dipetakan meliputi luasan lebih dari 200.000 hektar. Menurut Schroo (1963), dari luasan tersebut kurang lebih 100.000 hektar terdiri atas tanah yang kandungan P-nya sangat tinggi.

Berdasarkan data geologi menunjukkan bahwa Daerah Ayamaru terbentuk melalui proses lipatan, patahan, dan angkatan yang membentuk plateau dengan ketinggian 300-400 m di atas permukaan laut. Daerah ini terbentuk dari endapan batu kapur pada masa tersier muda. Formasi batuan kapur berliat, tergolong ke dalam margel atau batu kapur bermargel. Batuan kapur yang ada sebagian berkadar kuarsa tinggi.

Daerah ini terdapat karst yang berupa dolina, kuala dan drainase di bawah tanah (Schroo, 1963). Tanah yang terdapat di antara perbukitan karts berkadar fosfat sangat tinggi. Formasi batuan kapur termasuk formasi "Kais" yang terbentuk akibat sedimentasi atau endapan sisa-sisa bahan berkapur berupa coral pada tempat yang dangkal, endapan laut pada masa Miosin. Di daerah ini ditemukan beberapa fosil hasil kehidupan masa lampau dari organisme laut *Foraminifera* dan *Globegirina*.

Menurut Belford (1981) batu gamping pada formasi batuan di Ayamaru mengandung *foraminifera*: *Operculina sp.*, *Planorbulina sp.*, *Amphistegina sp.*, *Cycloclypeus (Katacycloclypeus) sp.*, *Gypsina sp.*, *Elphidium sp.*, *Lepidocyclina sp.*, *Sorites sp.*, *Spiroclypeus sp.*, *Lepidotema*

sp., *Carpenteria sp.*, kelompok *Globigerinoides quadrilobatus* dan *Miliolida*. Batuan induk berkadar P rendah disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Batuan Induk dan Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru

Hasil analisis sampel batuan menunjukkan bahwa rerata kadar Magnesium dan Fosfor rendah dengan kadar rerata MgO sebesar 0,52, dan P_2O_5 berkisar 0,30 %. Hasil analisis ini mengindikasikan bahwa TEFK tidak didominasi mineral apatit maupun dolomit. Dengan demikian dapat dipastikan bahwa tanah Ayamaru terbentuk dari batuan hasil sedimen laut yang mengandung fosfat sangat tinggi. Berdasarkan hasil analisis fosfat tersedia menggunakan metode Truog pada contoh tanah Ayamaru yang dilakukan Schroo (1963) menunjukkan kadar P berkisar 1 – 28 % P_2O_5 .

Dengan demikian dapat dipastikan bahwa tanah Ayamaru terbentuk dari batuan hasil sedimen laut yang mengandung fosfat sangat tinggi. Berdasarkan hasil analisis fosfat tersedia menggunakan metode Truog pada contoh tanah Ayamaru yang dilakukan Schroo (1963) menunjukkan kadar P tersedia sangat tinggi. Selanjutnya dilakukan analisis beberapa contoh tanah dengan metode ekstraksi asam Fleishman (50% H_2SO_4 + 50% HNO_3). Berdasarkan hasil analisis diperoleh kadar P_2O_5 sebesar 18 %, suatu nilai yang sangat tinggi untuk tanah mineral umumnya.

Berdasarkan keadaan iklimnya, Daerah Ayamaru dipengaruhi oleh iklim tropika basah dengan rerata curah hujan 3500 mm pertahun, dan secara nisbi tersebar seragam sepanjang tahun, tetapi agak berkurang pada bulan oktober. Bulan basa sepanjang tahun tanpa bulan kering.

Daerah Ayamaru terdiri atas dataran dan perbukitan. Tipe fisiografi daerah ini dapat digolongkan sebagai Karts yang dicirikan oleh adanya *Uvala* dan *Conical fold*.



Gambar 4.2. Topografi Daerah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru

Diduga bentuk topografi asal adalah datar dengan dilapisi oleh sedimen alluvium. Sebagai akibat adanya lipatan, patahan dan angkatan maka terbentuk topografi bergelombang. Setelah adanya pencucian hancuran batuan kapur yang didahului oleh proses erosi yang berada di atas batuan kapur, maka terbentuklah formasi seperti yang disajikan pada Gambar 4.2. Formasi ini oleh Schroo (1963) disebut sebagai "*Sugaricaf Topografi*".

Daerah bukit umumnya ditempati hutan sekunder. Hutan primer jarang ditemukan. Pada bagian lembah (*Uvala*) umumnya ditutupi dengan semak dan belukar yang didominasi oleh jenis paku-pakuan.

4.2. Tanah Endapan Fosfat Krandalit (TEFK)

Fosfat alam asal Ayamaru disebut Tanah Endapan Fosfat Krandalit (TEFK). Faktor-faktor pembentukan TEFK Ayamaru yaitu bahan induk, iklim organisme, dan relief dikaji secara umum berdasarkan data geologi, data iklim yang tersedia dan hasil kajian lapangan.

Endapan fosfat dapat dibedakan menjadi dua jenis utama yaitu endapan primer dan endapan sekunder. Endapan primer terjadi dari intrusi urat hidrotermal. Endapan ini sering berasosiasi dengan batuan beku alkalin yang mengandung mineral karbonat, nefelin, senit, dan piroksin (Bisri dan Permana, 1991). Endapan fosfat sekunder dapat dipilah atas endapan laut (*deposit marin*) dan endapan guano (*cave deposit*).

Endapan laut terbentuk dari hasil penguraian berbagai kehidupan yang ada di laut, atau akibat erosi mineral-mineral yang mengandung fosfat oleh asiran sungai yang kemudian terbawa ke laut. Partikel-partikel fosfat akan menggumpal dan mengendap sebagai pellet di dasar laut. Akibat adanya peristiwa geologi, endapan akan terangkat dan membentuk daratan yang berasosiasi dengan kapur dan dolomit (Bisri dan Permana, 1991). Endapan fosfat guano berasal dari sisa kotoran sejenis burung maupun bangkai binatangnya yang bereaksi dengan hasil pelapukan batuan. Umumnya endapan fosfat yang terdapat di Indonesia adalah endapan guano, kecuali endapan fosfat di Ayamaru. Menurut Schroo (1963); Siregar dkk (1987) bahwa endapan fosfat tanah yang terdapat di Ayamaru termasuk endapan marin yang bercampur dengan endapan guano.

Kelompok endapan fosfat marin terbentuk akibat sedimentasi bawah air tanah pada batuan sedimen dan tanah yang merupakan hasil hancuran dari mineral fosfat yang lain. Mineral fosfat sekunder dapat terbentuk akibat reaksi antara kalsium dengan mineral lainnya seperti *wardite*, *variscite* dan *wavellit*. Falster (1986) menemukan kristal mineral berbentuk triangular bergabung dengan *wavelit* dalam *nodul* dan *veins* pada batu pasir.

Berdasarkan komposisi dan lingkungan pembentuknya, menurut Rumawas (1990), secara kimiawi endapan fosfat alam sangat bervariasi dan dapat dibedakan atas tiga kelompok besar yaitu: 1) Fe-Al-P, misalnya yang didominasi oleh *Strengite* ($\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), *Variscite* ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), *wavelit* (Al_3PO_4). 2) Ca-Al-P, misalnya: mineral krandalit dengan rumus kimia $(\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O})$, 3) Ca-P misalnya Fluorapatit yang banyak dijumpai adalah $(\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2)$.

Berdasarkan ikatan kimia antara atom-atom penyusun mineral di atas, dapat disimpulkan bahwa endapan fosfat yang didominasi oleh Fe, seperti wavelit, strengit, dan krandalit lebih stabil dibandingkan dengan apatit. Berdasarkan komposisi kimianya, maka dapat dikatakan bahwa ikatan antara fosfat dan Al lebih kuat dibandingkan dengan ikatan antara fosfat dengan Ca pada mineral Apatit. Berdasar ketiga

kelompok mineral tersebut di atas, mineral apatit paling mudah larut, sedangkan mineral lainnya kelarutannya rendah.

Mineral penyusun endapan fosfat krandalit berbeda dengan endapan fosfat alam lainnya yang biasa digunakan sebagai bahan baku pupuk. Mineral fosfat alam umumnya didominasi oleh mineral apatit yang merupakan sumber bahan baku pupuk fosfat.

Disamping mineral krandalit, tanah Ayamaru juga mengandung hara lainnya. Hasil analisis total contoh tanah baku no. B. 6252 oleh Schroo (1963), disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Hasil Analisis Tanah yang Berasal dari Ayamaru (Schroo, 1963)

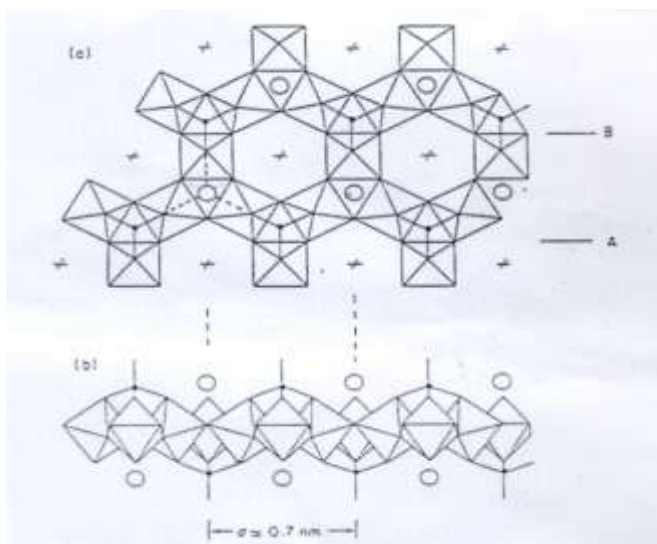
Jenis Analisis	Kadar (%)	Jenis Analisis	Kadar (%)
P ₂ O ₅	18,60	F	0,04
Al ₂ O ₃	25,10	NiO	0,05
Fe ₂ O ₃	15,80	SrO	0,35
CaO	8,30	Na ₂ O	0,05
MgO	0,80	MnO	0,60
K ₂ O	0,50	SiO ₂	2,40

Sumber: Hasil analisis Laboratorium (Schroo, 1963).

Berdasarkan Tabel 4.1 tampak bahwa selain kadar P yang tinggi, tanah Ayamaru juga mengandung hara lainnya yaitu Fe dengan konsentrasi sangat tinggi, serta unsur-unsur ikutan yang dapat dikelompokkan sebagai hara bermanfaat. Unsur-unsur tersebut adalah: Al, Ni, Sr. Secara kimiawi, adanya Al, Ni, Sr dan unsur ikutan lainnya yang tinggi merupakan salah satu kendala yang perlu diperhatikan bila tanah ini dijadikan sebagai bahan pupuk. Kehadiran unsur-unsur Al, Ni, dan Sr pada konsentrasi tertentu dalam larutan tanah dapat menyebabkan toksik bagi tanaman.

Albert dan Kidwel (1981) mengemukakan bahwa mineral krandalit termasuk mineral yang belum banyak diketahui dan jarang ditemukan dalam tanah. Mineral ini biasanya berasosiasi dan merupakan produk dari alterasi mineral Wavelit yang mempunyai kesamaan struktur. Mineral krandalit berwarna kekuningan sampai kecoklatan, dan umumnya berporus. Pada umumnya tanah di Pulau karang daerah Pasifik mengandung mineral krandalit. Diperkirakan mineral ini terbentuk karena reaksi antara guano dengan abu vulkan. Mineral krandalit sangat stabil dalam tanah, sehingga kelarutan fosfornya sangat rendah.

Stevenson (1986) mengemukakan bahwa mineral krandalit termasuk kelompok mineral Plumbogumit. Mineral lain yang juga termasuk kelompok Plumbogumit adalah: mineral-mineral l Gorceixite ($\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), Goyazite ($\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$), dan mineral Florencite ($\text{CeAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$). Fosfat menempati posisi tetrahedral dan aluminium menempati posisi oktahedral. Unsur-unsur Pb, Ba, Sr, Ce, dan Ca, masing-masing terdapat pada ruang pori antara tetrahedral dan oktahedral. Adanya Sr pada TEFK memungkinkan terjadinya substitusi isomorfik oleh Sr kepada Ca karena memiliki ukuran ion yang relatif sama. Struktur mineral Krandalit disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Struktur Mineral Krandalit

Keterangan: a. Lapis tunggal, b. Irisan antara A dan B

Stevenson (1986) mengemukakan bahwa tanah yang didominasi oleh mineral krandalit, sebagian besar berfraksi halus dan secara proporsional kadar fosfatnya lebih dari 60%. Tanah tersebut terdapat pada berbagai regim temperatur, mulai dari daerah sedang sampai daerah tropis.

Mineral ini terkandung dalam fraksi lempung dan strukturnya mirip mineral-mineral alumina silikat. Menurut Schroo (1963), adanya unsur Sr pada tanah Ayamaru yang didominasi oleh mineral Krandalit adalah memungkinkan terjadinya substitusi isomorfik secara parsial terhadap Kalsium oleh Stronsium. Kondisi seperti ini menurut Lindsay dan Vlek (1977), bahwa struktur krandalit tersusun secara iso struktur berseri, yaitu terdapat tiga kedudukan struktur. Fosfat menempati

struktur tetrahedral, Al dan Fe menempati oktahedral dan kedudukan ketiga dapat diisi berbagai kation, seperti Na, K, NH₄, Ag, Sn, Ba, dan Pb.

Kristalografi Mineral Krandalit

Sistem kristal: Trigonal Parameter sel : a = 7, c = 16.19

Ratio a:c = 1 : 2.313

Data optik: Type : Uniaxial (+)

Relief permukaan: Moderat

Assosiasi : Wardite, Variscite, Millisite

Group :

Graulichite-(Ce) : $\text{CeFe}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$ Dursertite : $\text{BaFe}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_5$

Zairite : $(\text{Bi})(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_6$

Arsenocrandallite : $(\text{Ca}, \text{Sr})\text{Al}_3[(\text{As}, \text{P})\text{O}_4]_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Goyazite : $\text{SrAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Arsenogoyazite : $\text{SrAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$

Gorceixite : $\text{BaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Arsenogorceixite : $\text{HbaAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_6$

Plumbogummite : $\text{PbAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Philipsbornite : $\text{PbAl}_3(\text{AsO}_4)_2(\text{OH})_2$

Beberapa sifat kimia dan Fisika Mineral Krandalit (Crandallite)



Crandallite
Locality: Mont-des-Orseillers, Batain, Hainaut (Henegouwen, Henegou)
Province, Belgium

Gambar 4.4. Struktur Mineral Krandalit (Ditemukan: Tahun 1917).

Formula : $\text{CaAl}_3(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_5 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Elements : Al, Ca, H, O, P

Unsur ikutan : Sr, Ba, Fe, C, Zn, Ni

Sinonim : Calcio-wavellite Crandallita Lime-wavellite Crandallit
Kalkwavellit Pseudo-wavellie

Varitas : Strontian Crandallite

Sifat Fisik

Warna : Kuning, putih, abu-abu

Kekerasan : 5

4.3. Klasifikasi

Berdasarkan sifat fisik dan kimia tanah maka TEFK Ayamaru dapat diklasifikasikan pada Kategori Ordo Inceptisol. Ordo Inceptisol adalah tanah-tanah yang kecuali dapat memiliki epipedon okrik dan horizon albik seperti yang dimiliki tanah Entisol juga mempunyai sifat penciri lain (misalnya horizon kambik) tetapi belum memenuhi syarat bagi ordo tanah yang lain. Tanah Inceptisol dapat mengarah pada pembentukan tanah Alfisol bila terjadi translokasi liat dan terbentuk argilik. Kejenuhan basa tanah ini > 35 %. Uraian profilnya disajikan pada Tabel 4.2. dan Gambar 4.5.

Tabel 4.2. Uraian Profil TEFK Ayamaru

No.	Kedalaman(cm)	Horison	Uraian
1.	0 – 20	A1	Coklat kekelabuan (10 YR 3/2), geluh debuan, granular, halus, lemah, agak lekat, agak teguh, perakaran sedikit; pH 6,2.; P-Bray I 140 ppm.
2.	20 - 45	A2	Coklat tua kekuningan (10 YR 4/4), lempung debuan, Gumpal, halus, lemah, lekat, sangat teguh; pH 6,2; P-Bray I 160 ppm.
3.	45 – 80	BA	Coklat kekuningan (10 YR 5/4), lempung, Gumpal, sedang, sangat lekat, sangat teguh, pH 6,7, P-Bray I 180 ppm.
4.	80 – 120	BC	Coklat kekuningan (10 YR 5/8), lempung, gumpal, sedang, sangat lekat, sangat teguh, terdapat fragmen kapur

Inceptisol adalah tanah yang belum matang (*immature*) dengan perkembangan profil yang lebih lemah dibandingkan dengan tanah matang, dan masih banyak menyerupai sifat bahan induknya. Tanah Inceptisol Ayamaru dapat diduga arah perkembangannya membentuk tanah Alfisol. Hasil analisis kejenuhan basa lebih besar dari 35% pada kedalaman 120 cm.



Gambar 4.5. Profil Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru

Prakiraan Cadangan Fosfat Alam Ayamaru

Seperti yang telah diuraikan sebelumnya bahwa Kabupaten Maybrat memiliki salah satu sumberdaya alam berupa tanah yang mengandung fosfat krandalit seluas lebih dari 100 ribu hektar (Schroo, 1963). Hingga saat ini fosfat alam tersebut belum dimanfaatkan atau dikembangkan, kecuali sebagai lahan pertanian tradisional. Rata-rata kadar fosfatnya 20% dengan kedalaman umumnya lebih dari 1,50 meter. Selanjutnya fosfat alam ini disebut Tanah Endapan Fosfat Krandalit (TEFK). Hasil-hasil penelitian menunjukkan bahwa TEFK berpotensi dimanfaatkan untuk untuk industri pupuk fosfat. Bila diasumsikan bahwa dari 100.000 hektar, hanya 25% yang dapat dieksploitasi pada kedalaman 50 cm saja, maka besarnya cadangan fosfat alam di Kabupaten Maybrat mencapai 100 juta ton. Jumlah cadangan fosfat ini lebih besar dibandingkan dengan cadangan fosfat alam yang ada di seluruh Indonesia yang hanya mencapai 20 juta ton (DSDM, 2004).

Bila dari cadangan 100 juta ton TEFK, diasumsikan hanya 25% yang dapat digunakan sebagai bahan baku industri pupuk fosfat, serta masyarakat lokal dapat diberdayakan langsung dan memperoleh Rp 100 (seratus rupiah) saja per kg TEFK, maka jumlah uang yang dapat menjadi sumber penghasilan masyarakat di Kabupaten Maybrat sebesar $2.5 \times 10^7 \text{ ton} \times 10^3 \text{ kg ton}^{-1} \times \text{Rp } 100 \text{ kg}^{-1} = \text{Rp } 2.5 \text{ T}$ (dua trilyun limaratus milyar rupiah). Jika Bahan baku tersebut diproses untuk dijadikan pupuk fosfat cair maka nilai tambah bahan tersebut meningkat menjadi 25 Trilyun rupiah.

Kualitas TEFK sebagai bahan baku pupuk dapat ditingkatkan melalui campuran dengan bahan organik padat maupun ekstraknya. Teknologi pemanfaatan TEFK sebagai pupuk perlu disosialisasikan kepada Pemerintah Daerah Kabupaten Maybrat maupun masyarakat sebagai pemilik Hak ulayat atas sumberdaya alam tersebut.

5. METODE PEMANFAATAN FOSFAT ALAM

Sejalan dengan meningkatnya produksi pangan, kebutuhan pupuk juga meningkat dengan pesat. Jika dalam tahun 1970 penggunaan pupuk NPK pada subsektor tanaman pangan hanya mencapai 197 ribu ton, dalam tahun 1980 telah meningkat menjadi 912 ribu ton atau sekitar lima kali lipat dari penggunaan pada tahun 1970. Berdasarkan data tersebut dapat diprediksi bahwa kebutuhan pupuk NPK pada tahun 1990 tidak kurang dari 4,5 juta ton. Pada tahun 2001 PT Petro Kimia Gresik mengimpart 7.570 ton TSP (Wiyana 2001).

Meningkatnya penggunaan pupuk tersebut menunjukkan bahwa kesadaran para petani untuk penggunaan pupuk terus meningkat dan semakin meluas disamping meningkatnya luas areal usaha tani secara nasional. Dengan semakin berkembangnya kegiatan penelitian untuk meningkatkan produksi sektor perkebunan, maka sejak tahun 1970-an perkebunan-perkebunan besarpun sudah mulai menggunakan pupuk secara intensif. Dalam tahun-tahun mendatang kita masih tetap dihadapkan pada permasalahan ketahanan pangan. Produksi pangan masih tetap dituntut untuk terus menerus ditingkatkan. Hal ini berarti kebutuhan pupuk untuk subsektor tanaman pangan dimasa mendatang akan meningkat pula.

Salah satu aspek yang sangat penting dalam penggunaan pupuk adalah masalah peningkatan efisiensi. Kenaikan harga pupuk yang sangat dirasakan terutama oleh para petani dalam lima tahun terakhir akibat krisis ekonomi yang melanda negara Indonesia, maka penggunaan pupuk kimia harus dikurangi dan disubstitusi sebagian dengan pupuk-pupuk alam yang relatif lebih murah dan ramah lingkungan. Penggunaan pupuk alam seperti batuan fosfat dan bahan organik perlu mendapat perhatian yang didasarkan atas kajian-kajian yang intensif dan berkelanjutan. Deposit fosfat alam di Indonesia umumnya berkualitas rendah, dan kurang sesuai untuk penggunaan langsung sehingga diperlukan teknologi pemanfaatannya. Produk-produk pelapukan batuan beku dan sedimen apatit yang juga mengandung Fe, Al, Mg, dan Cl yang tinggi tidak efektif digunakan secara langsung (Gremillon and McClellan, 1975; Van Kauwenbergh and

Hellums, 1995). Beberapa perusahaan di Dunia yang memproduksi fosfat alam terdapat di USA, China, Marokko, dan Sahara Bagian Barat serta Rusia yang menghasilkan kurang lebih 72 persen dari total produksi fosfat dunia.

Penggunaan fosfat alam secara langsung sangat terbatas dan sulit dievaluasi. Kebanyakan negara-negara yang menggunakan fosfat alam secara langsung tidak mengklasifikasikannya sebagai pupuk. Penggunaan fosfat alam secara langsung hanya mencapai 1,4 –5,6 persen dari total konsumsi P_2O_5 . Jumlah ini ekuivalen dengan 1,50 juta ton (Maene, 2003). Data Statistik penggunaan fosfat alam secara langsung di dunia menurut Maene (2003) menunjukkan bahwa terjadi penurunan dari 1,66 juta ton P_2O_5 pada tahun 1980 menjadi 0,57 juta ton pada tahun 1998. Fosfat alam dari Tunisia, China, Pulau Christmas, Egypt, Jordan, Israel, Marokko dan Peru secara kontinyu dihasilkan untuk penggunaan langsung. Berdasarkan data menunjukkan bahwa Indonesia tidak termasuk negara penghasil fosfat alam. Kurang lebih 88 persen cadangan fosfat alam di Asia terdapat di Irak, Israil, Jordan, dan China. Dari cadangan yang sudah diidentifikasi hanya 187.000 ton atau di bawah 1% produksi fosfat dunia terdapat di Indonesia. Dari hasil-hasil survei selama lima tahun terakhir ini diperkirakan cadangan fosfat alam di Indonesia dapat mencapai lebih dari 20 juta ton.

5.1. Pemupukan dengan Fosfat Alam

Lahan-lahan yang luas di daerah tropika dan subtropika di Asia termasuk Indonesia, Afrika, dan Amerika latin mengalami pelapukan yang intensif dan menghasilkam tanah-tanah yang tidak subur. Produksi tanaman di Daerah-daerah tersebut sangat rendah serta terjadi degradasi lahan akibat pembukaan hutan, pengembalaan serta penerapan sistem pertanian yang tidak tepat. Disamping itu terdapat masalah sosial ekonomi, tanah bereaksi masam dan rendahnya N serta P (Lai, 1990; Formosa, 1999). Input N dapat dilakukan melalui sumber-sumber N alami seperti fiksasi N dari udara secara biologi melalui fiksasi, pemberian bahan organik, sedangkan input P dibutuhkan selain menambah hara P di dalam tanah juga memperbaiki status P untuk menghasilkan kondisi yang sesuai dengan kebutuhan tanaman. Tanah-tanah di daerah tropika, dan subtropika didominasi oleh tanah-tanah mineral masam, sering defisiensi P dengan kapasitas fiksasi (*sorption*) yang sangat tinggi sehingga sulit tersedia bagi tanaman. Oleh karena itu substansi pemberian P ke dalam tanah mebutuhkan strategi pengelolaan yang tepat untuk pertumbuhan tanaman secara optimum (Sanchez and Buol, 1975; Date *et al.*, 1995).

Pemupukan P dengan menggunakan pupuk P seperti superfosfat umumnya direkomendasikan untuk mencegah defisiensi P. Hal ini menyebabkan beberapa negara berkembang termasuk Indonesia mengimport pupuk P yang suplainya juga terbatas ke para petani di daerah-daerah miskin. Intensifikasi untuk meningkatkan produksi pertanian tidak hanya melalui tindakan pemupukan, tetapi harus mengarah pada pengelolaan tanah yang ramah lingkungan. Penggunaan fosfat alam secara langsung merupakan salah satu tindakan yang bijak dalam praktek pemupukan yang ramah lingkungan serta lebih ekonomis dibandingkan dengan pupuk kimia seperti TSP maupun SP 36. Penggunaan fosfat alam pada tanah-tanah masam umumnya lebih efektif dan ekonomis dibandingkan dengan pemberian TSP di daerah tropika (Chien and Hammond, 1978; Sale and Mokwunye, 1993).

Reaktivitas merupakan kemampuan pupuk P-alam untuk melepaskan P. Kemampuan ini dipengaruhi oleh kombinasi sifat pupuk seperti komposisi kimia, jenis-jenis mineral, dan ukuran partikel. Luas permukaan sangat berpengaruh terhadap kelarutan pupuk P-alam. Semakin halus ukuran partikel, semakin banyak kemungkinan kontak antara pupuk P-alam dan tanah sehingga kelarutannya semakin tinggi. Pengukuran kereaktifan fosfat alam telah dilakukan dengan menggunakan berbagai prosedur antara lain: ekstraksi dengan bahan kimia, difraksi sinar X, infra merah, metode permukaan jenis, dan analisis unsur (Khasawneh dan Doll, 1978). Ekstraksi kimia yang sering digunakan ialah dengan menggunakan ammonium sitrat netral, ammonium sitrat pH 3, asam formiat 2%, asam sitrat 2%, serta asam laktat 1% (Chiend dan Hammond, 1977; Khasawneh dan Doll, 1978). Ketepatan menggunakan metode-metode tersebut bersifat nisbi. Dari berbagai metode ekstraksi yang telah dikembangkan, nampaknya belum ada kesepakatan dalam menentukan metode mana yang paling tepat. Penentuan potensi agronomi dari fosfat alam di Indonesia umumnya dinyatakan sebagai P-larut dalam asam sitrat 2%.

Widjaya Adhi *et al.* (1985) dalam penelitiannya memperoleh kelarutan P dalam asam sitrat 2% merupakan petunjuk yang cukup baik untuk digunakan sebagai penduga respons tanaman padi terhadap pemberian fosfat alam secara langsung. Dari hasil percobaan menunjukkan bahwa rerata hasil padi PB5 dipengaruhi oleh takaran fosfat alam larut dalam asam sitrat 2%, dengan nilai koefisien determinasi sebesar 0,8.

Soepardi (1983) menyimpulkan bahwa pemberian fosfat alam langsung pada tanah, terutama fosfat alam yang tersedia setempat sangat menguntungkan. Keefektifan fosfat alam memasok P apabila

diberikan langsung, ditentukan oleh susunan kimia dan mineralnya. Fosfat alam yang kelarutannya rendah disebabkan karena kelarutannya dalam air juga rendah. Kerekatifan fosfat alam dapat dilakukan dengan cara pemberian bahan organik, pemanasan (kalsinasi), pengasaman parsial, dan pemberian mikroorganisme,

Bahan organik tanah dapat meningkatkan ketersediaan P dari P-alam. Keadaan ini disebabkan bahan organik dapat memasok proton dan terbentuknya senyawa kompleks Ca dan anion organik. Senyawa kompleks ini dapat mencegah peningkatan konsentrasi Ca dalam larutan tanah dan peninngkatan pH pada permukaan mineral apatit. Dengan demikian kelarutan P dapat ditingkatkan. Konsentrasi Ca dalam larutan tanah lebih rendah sehingga keseimbangan terganggu dan P lebih mudah larut. Kapasitas daya sangga, pH tanah untuk memasok proton juga sangat mempengaruhi kelarutan pupuk P-alam. Reaktivitas pupuk P-alam semakin meningkat dengan semakin kecilnya ukuran partikel. Pupuk P-alam berukuran 0,1 mm mempunyai luas permukaan spesifik lebih luas dari pada yang berukuran 0,5 mm. Pelepasan, gerakan, dan pengisian P dalam tanah sangat ditentukan oleh ukuran partikel P-alam. Jadi semakin halus ukuran partikel, semakin banyak P yang diserap tanaman

5.2. Pentingnya Industrialisasi pupuk Fosfat

Kebutuhan pangan dunia terus meningkat sejalan dengan peningkatan jumlah penduduk yang sangat pesat. Jumlah penduduk dunia saat ini berkisar 6, miliar dan akan meningkat menjadi 8 miliar pada tahun 2020. Peningkatan jumlah penduduk dibarengi dengan kebutuhan lahan untuk pertanian maupun non pertanian yang sangat besar. Kondisi ini menyebabkan terjadi degradasi lahan yang secara umum disebabkan pengelolaan yang salah. (Oldeman, 1994; FAO, 1995; UNEP, 2000).

Peningkatan kebutuhan pangan dari tahun ketahun selalu meningkat sehingga beberapa negara telah mengembagkan program ketahanan pangan yang berkelanjutan. Hal ini berkaitan dengan ketersediaan areal lahan per kapita, kebutuhan akan air bersih, kondisi sosial ekonomi dari sektor pertanian serta faktor internal termasuk konflik antar pengguna lahan (Hulse, 1995).

Upaya meingkatkan hasil tanaman akan membutuhkan sumberdaya lahan dan air yang juga meningkat. Sebagai contoh: (i) intensifikasi pertanian membutuhkan lahan yang berkualitas (ii) Penggunaan lahan marginal yang cukup sesuai, dan (iii) Pencegahan dan rehabilitasi lahan-lahan yang terdegradasi.

Peningkatan intensifikasi, diversifikasi dan spesialisasi sistem produksi pertanian menuntut penambahan dukungan produktivitas input secara umum, inovasi teknologi spesifik, kajian khusus dan alih teknologi jangka pendek. Penerapan teknologi tersebut harus diprioritaskan beberapa hal sebagai berikut: (i) intensitas penanaman berbagai varietas tanaman yang memiliki potensi genetik yang mampu beradaptasi pada lingkungan tertentu, (ii) Meningkatkan efisiensi penggunaan hara yang efisien serta pengelolaan sumber hara secara terpadu melalui pengelolaan sistem pertanian yang tepat (iii) Konservasi tanah dan air melalui pemberian sisa-sisa bahan organik dan pengolahan tanah (iv) Perbaiki efisiensi penggunaan air melalui metode irigasi dan daur ulang bahan organik dan air secara tepat (Lai, 2000).

Pengembangan dan aplikasi pengelolaan hara terpadu dalam sistem pertanian berkelanjutan di negara-negara berkembang diarahkan pada penggunaan pupuk-pupuk kimia seminal mungkin, penggunaan sumber pupuk fosfat alam, fiksasi nitrogen, penggunaan bahan organik serta kombinasinya dalam suatu daur ulang yang tepat (FAO, 1995). Penerapan teknologi tersebut harus menggunakan sumberdaya lokal yang tersedia untuk mensuplai hara tanaman dalam sistem pertanian terpadu yang spesifik dan sosialisasi kepada para petani (FAO, 1998; Chalk et al., 2002). Penggunaan fosfat alam lokal di daerah tropis sangat dianjurkan dalam sistem ini.

Pupuk P-Alam merupakan bahan baku pembuatan SP-36 dan super fosfat lainnya. Pupuk P ini dapat digunakan sebagai pupuk alternatif pengganti SP-36 yang kini semakin mahal dan sulit diperoleh para petani. Deposit pupuk P-alam berkualitas tinggi di Indonesia tidak banyak, sehingga impor pupuk P-alam dari luar negeri (Marokko, Tunisia, dan Cina) tidak bisa dihindari. Meskipun demikian harus dipertimbangkan agar impor pupuk P-alam tersebut tidak hanya untuk melakukan rekapitalisasi P. Pemberian pupuk P-alam sekaligus dalam takaran tinggi (1 ton ha^{-1} untuk beberapa musim tanam) tidak menguntungkan karena kepemilikan modal petani sangat terbatas (Aljabri, 2001). Sebelum pupuk P-alam dipromosikan secara besar-besaran, terlebih dahulu perlu dikaji karakteristik pupuk dan interaksinya dengan tanah, reaktivitasnya, metode dan waktu pemberian yang tepat, takarannya, penggunaannya sebagai investasi modal, serta prospek penggunaannya untuk rehabilitasi tanah sulfat masam dan tanah-tanah marginal lainnya.

Karakteristik pupuk P-alam dapat diketahui melalui pengamatan tentang mineralogi, kristalografi, dan analisis kimia, sehingga unsur

utama dan ketersediaannya bagi tanaman dapat diketahui. Pupuk P-alam didominasi oleh mineral apatit (50-90%) dengan bahan ikutannya berupa kuarsa, liat, besi, dan aluminium oksida, kalsit, dolomit, dan gypsum. Kalsium apatit yang berasal dari batuan sedimen termasuk pupuk P-alam reaktif sehingga dapat langsung digunakan sebagai sumber P, sedangkan fluor apatit yang kelarutannya rendah termasuk pupuk P-alam tidak reaktif. Reaktivitas dirumuskan sebagai nisbah antara P-larut dalam asam sitrat 2% dengan P-total (Musaad, 1996).

Pupuk P-alam dikatakan reaktif bila kombinasi sifat pupuk dan sifat tanah dapat meningkatkan kelarutan P. Bila kelarutan P sangat rendah, maka P-alam dikatakan tidak reaktif. Efektivitas kelarutan P-alam lebih reaktif pada tanah masam termasuk tinggi terutama bila pH tanah < 4,5 dan konsentrasi P larutan tanah awal sangat rendah. Jika pH < 4,5 maka tanah perlu diberi kapur untuk menaikkan pH sampai 4,5 untuk padi atau 5,0 untuk kedelai (Al-Jabri, 2001). Kelarutan pupuk P-alam juga menurun bila pH tanah lebih dari 6,0. Kapasitas Tukar Kation (KTK) tanah juga harus tinggi dengan kandungan C-organik tanah sedang sampai tinggi (sekitar 5%) dan kejenuhan kation Ca rendah. Kondisi tersebut memungkinkan ion P dari pupuk P-alam dapat ditahan di daerah pertukaran. Ion P tersebut selanjutnya diserap akar melalui difusi dan aliran masa. Menurut hasil penelitian, sebagian besar ion P diserap akar melalui proses difusi.

Eksploitasi cadangan fosfat umumnya untuk Industri di dunia dilakukan secara komersial. Komposisi deposit fosfat ini sangat beragam. Batuan fosfat sebagai sumber P komersial digunakan sebagai bahan baku pembuatan pupuk P juga mengandung berbagai komponen kimia seperti Fe, Cu, dan S. sebagian unsur-unsur tersebut dapat mensubstitusi komponen lainnya dalam siklus unsur-unsur dalam sistem tanah tanaman.

Kurang lebih 90 persen deposit fosfat alam digunakan untuk industri pupuk. Batuan fosfat dan asam sulfat merupakan bahan baku pembuatan pupuk Single Super Fosfat (SSP) dan asam fosfat. Asam fosfat digunakan sebagai reagen antara untuk menghasilkan pupuk Triple Super Fosfat (TSP) dan ammonium fosfat. Saat ini pupuk-pupuk NPK berkadar tinggi dapat dihasilkan melalui industri pupuk (Engelstad dan Hellums, 1993; UNIDO dan IFDC, 1998).

Seperti sudah disebutkan bahwa Lebih dari 90% fosfat alam, khususnya Ca-fosfat ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), digunakan langsung sebagai pupuk atau bahan baku pupuk P buatan. Sisanya diserap oleh beberapa industri untuk keperluan senyawa kimia, atau diambil fosfornya untuk keperluan fotografi, korek api, bahan peledak, dan lain-lain. Sebagai

pupuk, fosfat alam dapat langsung digunakan setelah terlebih dahulu dihaluskan. Sebagai pupuk alam, fosfat alam tidak cocok diberikan pada tanah-tanah mineral bereaksi netral hingga alkalin. Hal ini disebabkan kelarutan fosfat alam sangat rendah pada tanah-tanah agak masam, netral hingga alkalin. Karena kelarutannya rendah, maka umumnya fosfat alam digunakan sebagai bahan baku pupuk P buatan seperti TSP dan SP36. Pupuk TSP dan SP 36 merupakan hasil reaksi antara tepung fosfat alam yang berkadar $> 30\%$ P_2O_5 dengan asam fosfat pekat. Jika tepung fosfat direaksikan dengan asam sulfat pekat, maka produk akhirnya berupa pupuk fosfat berkadar $< 30\%$ tau termasuk Single Super Fosfat (SSP). Berdasarkan Standar Industri Indonesia (SSI Nomor 0826 Tahun 1983), pupuk alam harus memenuhi persyaratan sebagai berikut:

1. P_2O_5 Total : min. 26% a.d.b.k
2. P_2O_5 larut dalam asam sitrat 2% : min. 3%
3. CaO : min. 40%
4. H_2O : maks. 20%
5. $Al_2O_3 + Fe_2O_3$: mak. 3%
6. Kehalusan (-80 mesh) : min. 60%

Ket; a.d.b.k = atas dasar berat kering.

Sedangkan Standar Industri Indonesia untuk Pupuk Fosfat buatan (SII Nomor 0029 Tahun 1973) adalah sebagai berikut:

- a. Super-fosfat Tunggal (Single Super Fosfat): Fosfat larut dalam air (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 13%.
- b. Super-fosfat Rangkap (Double Super Phosphate): Fosfat larut dalam air (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 38%.
- c. Super-fosfat Triple (Triple Super Phosphate): Fosfat larut dalam asam sitrat 2% (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 43%.
- d. Fosfat Bakar

Mutu I

-Fosfat Larut dalam asam mineral (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 19%.

-Fosfat larut dalam asam sitrat 2% (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 80% dari P_2O_5 yang larut dalam asam mineral.

-Kehalusan 80 mesh minimum 90%

Mutu II

-Fosfat larut dalam asam mineral (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 11%.

-Fosfat larut dalam asam sitrat 2% (dihitung sebagai P_2O_5) minimum 30% dari P_2O_5 yang larut dalam asam mineral.

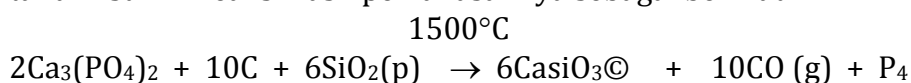
Kehalusan 80 mesh minimum 90%.

Dalam perdagangan, penilaian kadar P_2O_5 ditentukan atas dasar BPL (Bone Phosphate Lime), yang identik dengan persen $Ca_3(PO_4)_2$. $BPL = 2,1853 \times$ persen P_2O_5 (Hammand and day, 1992). Sumber fosfat lainnya pertama kali diperoleh dari tepung tulang untuk industri pupuk fosfat. Persyaratan minimum kadar P_2O_5 dalam batuan fosfat untuk industri pupuk fosfat dan asam fosfat adalah 28 persen. Umumnya batuan fosfat yang diperdagangkan untuk industri pupuk berkadar > 30 persen P_2O_5 (65 persen BPL).

Salah satu perlakuan untuk meningkatkan kelarutan P dari fosfat alam adalah proses termal. Proses termal dapat dibedakan atas 2 tahap yaitu: (1) Kalsinasi dan (2) Modifikasi Termal.

Proses termal atau kalsinasi dilakukan untuk meningkatkan kelarutan P dari fosfat Alam sebelum digunakan sebagai pupuk. Proses termal dilakukan untuk fosfat alam dengan karakteristik sebagai berikut: (i) Memiliki bahan organik yang tinggi sehingga mempersulit proses pelarutan P dari fosfat alam dengan kelarutan yang rendah. (ii) Memiliki kemampuan substitusi apatit yang tinggi (iii) Fosfat lam yang dengan kadar karbonat tinggi sehingga dibutuhkan proses dekomposisi untuk untuk meperoleh P yang tinggi. Pengaruh proses termal terhadap kelarutan P dari fosfat alam sangat bergantung pada komposisi mineralnya.

Petruci (1987), mengemukakan bahwa unsur P dihasilkan pertama kali melalui proses termal batuan fosfat, silica dan kokas dalam tanur listrik. Reaksi hasil pemanasannya sebagai berikut:

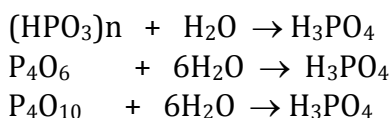


Fosfor yang dihasilkan berupa P_4 yang terkondensasi dan kemudian terkumpul sebagai padatan dalam tabung yang berisi air. Menurut Lange *et al.* (1991) bahwa titik cair batuan tidak lebih dari $1200 - 1500^\circ C$. Berdasarkan konsep ini maka salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kelarutan P dari fosfat alam adalah melalui proses termal.

Peningkatan suhu menyebabkan gerakan molekul-molekul dalam kisi kristal mineral penyusun fosfat alam tersebut meningkat, karena meningkatnya energi kinetik. Lebih lanjut Adha (1990), mengemukakan bahwa suhu sangat mempengaruhi kerentanan sifat magnet suatu mineral. Perubahan sifat magnetik menyebabkan pemisahan mineral-mineral yang terkandung dalam fosfat alam semakin mudah. Pada suhu kamar hingga $500^\circ C$ terjadi peningkatan magnetisasi beberapa mineral. Pada suhu $900^\circ C$ kerentanan magnet semua mineral tidak berubah,

sedangkan pada suhu lebih dari 900°C kerentanan magnet semua mineral mulai menurun. Terjadi perubahan sifat magnetisasi disebabkan karena perubahan struktur mineral, sehingga unsur-unsur penyusun dapat dilepaskan.

Hasil pemanasan batuan fosfat berupa senyawa-senyawa padatan dan gas. Sebagian besar karbonat terurai menghasilkan CaO dan CO₂. Gas CO₂ dan gas lainnya serta H₂O dibebaskan sehingga kadar P sebagai salah satu komponen padatan dalam bentuk oksida meningkat. Menurut Petrucci (1990), oksida-oksida P dapat berupa P₄O₆ dan P₄O₁₀ padatan. Senyawa P₄O₁₀ mencair pada suhu 580°C. Senyawa P dalam batuan fosfat yang bercampur liat kemungkinan akan mengalami polimerisasi bila dikalsinkan. Fosfat dalam bentuk polimer (HPO₄)_n maupun oksida bila terhidrolisis akan menghasilkan asam fosfat seperti pada reaksi di bawah ini:



Cohen (1979) mengemukakan bahwa air yang terikat secara fisik akan menguap pada suhu 50 - 170°C. Bahan organik akan rusak pada suhu 250°C, diikuti oleh disosiasi senyawa-senyawa hidrokarbon, dekomposisi sulfida-sulfida dan hilangnya air kristal dari mineral fosfat maupun mineral ikutan lainnya. Penguraian CaCO₃ menyebabkan menurunnya ratio CaO/P₂O₅ disertai peningkatan P₂O₅.

Modifikasi proses termal juga dapat dilakukan untuk meningkatkan kelarutan P dari fosfat alam. Prinsip dari proses ini adalah penguraian mineral apatit maupun mineral ikutan lainnya dengan atau tanpa penambahan pelarut. Tujuan proses ini adalah agar fosfat alam dapat digunakan secara efektif sebagai pupuk. Perlakuan termal menurunkan kelarutan dalam sitrat dari mineral francolit pada suhu 1000 - 1200°C. Kelarutan dalam sitrat juga dipengaruhi oleh mineral-mineral ikutan lainnya seperti kelompok mineral silica, Sulfat, klorida, dan karbonat.

Perlakuan termal pada kelompok fosfat alam yang didominasi Al, Fe misalnya mineral karandalit (CaAl₃(PO₄)₂(OH)₅.H₂O) pada suhu 500 - 600°C, telah dilakukan oleh Musaad (1996). Terjadi perubahan yang sangat drastis akibat perlakuan termal. Kehilangan air kristal (dehidroksilasi), struktur mineral kristalin hancur dan membentuk senyawa-senyawa amorf yang kelarutannya dalam sitrat lebih tinggi. Keefektifan akibat perlakuan termal pada fosfat alam yaitu terjadi peningkatan kelarutan P dan beberapa unsur ikutannya sangat

tergantung dari suhu pemanasan, jenis dan distribusi mineral-mineral ikutan.

Kemasaman tanah merupakan salah satu faktor tanah penting yang mempengaruhi ketersediaan P dari endapan fosfat. Keefektifan agronomi endapan fosfat menjadi lebih tinggi pada tanah-tanah masam dari pada tanah bereaksi netral atau alkalin (Soepardi, 1983). Hubungan ini dianggap sebagai pengaruh pH. Kondisi pH yang rendah meningkatkan kelarutan fosfat alam karena tersedianya ion H^+ bagi pemasamannya.

Pengaruh pengasaman terhadap sifat mineralogi belum banyak diketahui. Dapat dikemukakan bahwa keberadaan ion H^+ dalam jumlah tertentu dapat merusak struktur mineral karena sebagian unsur-unsur penyusun mineral tersebut akan larut. Ion H^+ masuk ke kisi kristal melalui lapisan inter layer dan ujung-ujung kristal, sehingga kation yang menempati struktur mineral tersebut akan digantikan oleh ion H^+ (Briendley, 1980).

Perlakuan asam keras pada mineral yang berbeda akan memberikan perubahan struktur yang berbeda pula. Misalnya pada mineral liat, struktur trioktahedral lebih mudah rusak bila diasamkan dan meninggalkan residu silica yang amorf. Pada diagram yang terdeteksi dengan X-ray, kenampakan struktur tidak jelas. Sedangkan pada kelompok mineral smektit, dioktahedral lebih resisten meskipun nontronit dan mineral oksida besi lainnya lebih mudah larut dibandingkan dengan spesies-spesies alumina. Tingkat kerusakan struktur akibat pemberian asam keras ditentukan oleh kestabilan mineral tersebut, jenis, konsentrasi serta volume asam yang digunakan.

Perlakuan asam keras pada fosfat alam akan meningkatkan kelarutan P dalam sitrat maupun P di dalam air. Proses pengasaman fosfat alam apatit akan menghasilkan pupuk fosfat atau asam fosfat. Perlakuan fosfat alam berkualitas tinggi dari mineral apatit dengan asam fosfat akan menghasilkan pupuk fosfat yaitu TSP atau SP36. Permasalahan utama proses pengasaman adalah adanya mineral-mineral ikutan lainnya terutama Al, dan Fe oksida. Fosfat alam yang mengandung Al dan Fe oksida > 5 % agak sulit diproses untuk menghasilkan pupuk Fosfat (TSP maupun SP36). Kebutuhan asam dalam proses pengasaman untuk menghasilkan pupuk fosfat sangat bergantung pada ratio Ca/P. Jika ratio Ca/P > 2,6 secara umum kurang ekonomis untuk pengasaman.

5.3. Pemanfaatan Fosfat Ramah lingkungan

Pemupukan fosfat sering tidak efisien karena fosfat terikat menjadi bentuk yang tidak tersedia bagi tanaman, sehingga efisiensinya rendah. Dari berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa kurang lebih 10 – 30% saja dari pupuk yang diberikan ke tanah dapat dimanfaatkan oleh tanaman. (Radjagukguk, 1992). Hal ini disebabkan karena adanya proses fiksasi P yang cukup tinggi oleh tanah terhadap pupuk yang diberikan. Peningkatan kelarutan P dari sumbernya seperti dari fosfat alam maupun P yang terfiksasi dapat dilakukan dengan menggunakan bahan organik dan mikororganisme.

Hasil akhir dekomposisi bahan organik berupa humus sangat berperan penting bagi kesehatan tanah terutama berkaitan dengan ketersediaan hara bagi tanaman baik yang bersumber dari batuan fosfat yang diberikan maupun pupuk lainnya. Terjadi peningkatan perkecambahan biji, pertumbuhan akar, penyerapan hara dan pengaruh fisiologis lainnya terhadap pertumbuhan tanaman. Dari beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa pertumbuhan tanaman akan meningkat signifikan dengan pemberian asam humat dan fulvat konsentrasi rendah (Rao, 1994). Mobilisasi N, P, dan K dari tanah ke sistem perakaran meningkat dengan adanya bahan-bahan humus. Pemberian asam humat dan fulvat pada tanah akan mengurangi fiksasi P dalam tanah. Penyerapan unsur kelumit juga meningkat dengan adanya penambahan humat karena humat dikenal secara efektif dapat membentuk kelat dengan logam kelumit terutama Fe. Kombinasi antara asam fulvat dan Fe diketahui lebih efektif dalam meningkatkan pembentukan perakaran lateral pada tanaman dibandingkan Fe saja. Kemampuan membentuk kelat oleh humat mengindikasikan bahwa humat mempunyai peranan yang mirip dengan EDTA (Asam Etilen-Diamino Tetra Asetat), pembentuk kelat sintesis yang terkenal.

Aktivitas enzim yang terlibat dalam metabolisme tanaman dikaitkan dengan kompleks humus karena asam humat berfungsi sebagai akseptor hydrogen. Aktivitas perangsang pertumbuhan oleh kompleks humus pada perakaran tanaman dikaitkan dengan adanya kegiatan sitokrom oksidase yang meningkat secara mencolok dalam sistem perakaran. Asam humat juga diketahui meningkatkan kegiatan enzim-enzim asam glutamat transaminase dan fosforilase dan juga sintesis asam nukleat deoksiribosa dan ribose (DNA dan RNA). Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa adanya pergeseran dalam metabolisme karbohidrat dalam tanaman yang diperntarai oleh perubahan kerja aldolase, sakarase, fosfatase dan amilase dengan adanya penambahan asam humat (Rao, 1994). Pengaruh pegkelatan

dari asam humat terhadap unsur-unsur kelumit mengurangi dampak lingkungan bila adanya logam-logam berat yang larut. Asam humat juga berperan dalam pertumbuhan dan perkecambahan mikroorganismenya.

Penggunaan fosfat alam yang diperkaya dengan mikroorganismenya sangat berpengaruh nyata dan lebih efektif dibandingkan dengan tanpa pemberian mikroorganismenya. Pertumbuhan *Aspergillus niger*, *Penicillium glaucum*, *Bacillus mycoides* dan *Scenedesmus* spp dipercepat dengan penambahan asam humat. Jumlah sel-sel *Azotobacter* dan jumlah nitrogen yang difiksasi juga makin banyak dengan penambahan asam humat. Aktivitas mikroorganismenya pelarut fosfat meningkat akibat pengaruh asam humat yang disertai pemberian fosfat alam.

Mikroorganismenya pelarut fosfat (MPF) adalah kelompok mikroba yang memiliki kemampuan untuk melarutkan fosfat tanah baik fosfat yang bersumber dari P asli tanah maupun dari fosfat yang ditambahkan. Peranan mikroba pelarut fosfat sangat penting terutama apabila dikaitkan dengan pemanfaatan fosfat alam untuk penggunaan langsung. Mikroba pelarut fosfat dapat berupa bakteri, fungi, dan aktinomicetes. Bakteri pelarut fosfat terdiri atas genus *Pseudomonas*, *Bacillus* dan *Escerichia*. Genus yang berperan dari golongan fungi adalah *Aspergillus*, *Penicillium* dan *Culvularia*. Sedangkan dari golongan aktinomicetes adalah genus *Streptomyces* (Bojinova *et. al.*, 1997).

Bakteri pelarut fosfat (BPF) adalah jenis bakteri yang mampu melarutkan senyawa fosfor anorganik menjadi fosfat yang dapat dimanfaatkan oleh tanaman. Beberapa jenis bakteri yang menguntungkan terutama dari genus *Pseudomonas* dan *Bacillus* memiliki kemampuan untuk mengubah senyawa-senyawa fosfat yang tidak larut dengan cara mengekskresikan asam-asam organik seperti asam laktat, asam glikolat, asam fumarat, dan asam suksinat. Asam-asam ini mengakibatkan pelarutan dari senyawa-senyawa yang ada dalam keadaan terikat, namun apabila terdapat kalsium karbonat, fosfat yang terlarutkan menjadi lebih sedikit. Asam sitrat menunjukkan kemampuan yang tinggi dalam melarutkan senyawa-senyawa fosfat anorganik secara tidak langsung. Reaksi-reaksi ini berlangsung di rizhosfir tanaman (Thien dan Mayer, 1992).

Mekanisme pelarutan P oleh mikroorganismenya didahului dengan sekresi asam-asam organik. Hasil sekresi tersebut akan berfungsi sebagai pelarut dan pengkhelet dalam reaksi dengan senyawa fosfat tidak larut (Goenadi, dkk, 2000). Pelarutan fosfat anorganik misalnya yang bersumber dari mineral di dalam tanah oleh bakteri pelarutan fosfat berlangsung terus menerus. Berkisar 10 – 50 persen bakteri tanah ternyata mampu melarutkan kalsium fosfat. Secara umum

bakteri pelarut fosfat yang dominan ditemukan dari rhizosfir termasuk ke dalam golongan bakteri aerobik pembentuk spora, dapat hidup pada kisaran pH 4 sampai 10,5 (Tatiek, 1991). Bakteri pelarut fosfat mampu mendominasi rhizosfer pada tanah dengan kandungan P yang rendah (Mohsin dan Alfonzo, 1990). Meskipun demikian pada tanah yang memiliki kandungan P yang tinggi, bakteri pelarut fosfat ini mampu lebih meningkatkan ketersediaan P pada tanah tersebut.

Pelarutan P oleh bakteri didahului dengan sekresi asam-pasam organik. Hasil-hasil sekresi tersebut akan berfungsi sebagai katalisator, pelarut dan pengkhelet dalam reaksi dengan senyawa-senyawa fosfat tidak larut (Pujiyanto, 2001). Menurut Subba Rao (1982), asam-asam organik tersebut akan menurunkan pH dan memecahkan ikatan pada beberapa bentuk senyawa fosfat. Hal tersebut ditunjang juga oleh pernyataan Narsian, V dan Patel (2000), bahwa pembebasan fosfat yang terikat dengan senyawa logam seperti Al dan Fe terjadi melalui pertukaran ion fosfat dengan anion-anion asam-asam organik tersebut sehingga akan melepaskan P dari ikatannya.

Peranan mikroorganisme dalam mentransformasi fosfor anorganik diantaranya adalah: 1) melarutkan senyawa fosfor anorganik, 2) mineralisasi senyawa organik dengan membebaskan fosfor anorganik ke dalam sel mikrobia, dan 3) menyebabkan proses oksidasi dan reduksi senyawa fosfat anorganik melalui transfer elektron.

Peningkatan kelarutan fosfat dapat juga dilakukan oleh fungi. Hasil penelitian Goenadi, dkk (1999) menunjukkan bahwa fungi pelarut fosfat yang diisolasi dari tanah hutan tropis Sumatera mampu meningkatkan kelarutan dari batuan fosfat Marokko. Hasil penelitiannya juga menjelaskan bahwa jumlah fosfat terlarut berkorelasi nyata dengan pH medium yang menunjukkan bahwa mekanisme pelarutan fosfat oleh fungi pelarut fosfat tersebut dikendalikan oleh metabolit primer organik.

Mikoriza merupakan hasil simbiosis antara akar tanaman tingkat tinggi dengan cendawan (Sieverding, 1991). Berdasarkan cara infeksiya terhadap tanaman inang, mikoriza dapat dikelompokkan dalam 3 golongan yaitu (1) ektomikoriza, (2) endomikoriza dan (3) ektendomikoriza. Cendawan ektomikoriza banyak dijumpai pada tanaman hutan terutama pinus. Cendawan ini dapat dilihat secara langsung di lapangan dengan mata biasa. Bagian akar yang terinfeksi akan membesar atau membengkak dan bercabang dikotom, serta permukaan akar diselimuti miselia yang biasa disebut mantel. Hifa cendawan ektomikoriza ini berkembang di antara `dinding-dinding sel jaringan korteks.

Menurut Mosee (1991), adanya infeksi oleh endomikoriza dapat dicirikan dengan dibentuknya vesikula dan arbuskula, sehingga dikenal dengan MVA (Mikoriza Vesikula Arbuskula). Infeksi tipe mikoriza ini terjadi di dalam sel. Vesikula berbentuk semacam kantung, biasanya terletak pada ujung hifa internal yang banyak mengandung lemak, berfungsi sebagai organ penyimpan cadangan makanan. Arbuskula (*intraseluler*) adalah hifa yang masuk ke dalam sel korteks tanaman inang, kemudian hifa bercabang-cabang. Diduga melalui arbuskula inilah terjadi translokasi unsur hara (P) antara tanaman inang dengan mikoriza. Arbuskula pada umumnya dibentuk sekitar 2 sampai 3 hari setelah akar terinfeksi.

Selain vesikula dan arbuskula, endomikoriza ini memiliki komponen lain yaitu hifa inter dan intra seluler dalam korteks serta eksternal miselium di sekitar akar tanaman. Jaringan hifa yang terletak di bagian luar akar merupakan perluasan permukaan akar. Dengan adanya hifa-hifa maka memungkinkan akar menyerap unsur hara terutama P dengan jangkauan yang lebih luas dan lebih jauh. Berbeda dengan ektomikoriza, kolonisasi mikoriza arbuskula tidak menyebabkan terjadinya perubahan morfologi akar sehingga kuantifikasi kolonisasi cendawan ini harus melalui pengamatan dengan mikroskop.

Manfaat utama simbiosis antara mikoriza dengan tanaman yaitu kemampuannya dalam meningkatkan pertumbuhan tanaman. Peningkatan kapasitas penyerapan P yang bersumber dari P asli tanah atau pupuk yang diberikan misalnya fosfat alam oleh tanaman yang bermikoriza dapat terjadi secara langsung melalui sistem jaringan hifa eksternal (*eksternal hyphae*). Secara tidak langsung adalah penyerapan yang diakibatkan oleh adanya perubahan fisiologi akar. Jalinan hifa eksternal memperluas areal permukaan penyerapan yang lebih jauh untuk mencari unsur hara dan air yang relatif tidak terjangkau oleh sistem perakaran (Smith dan Read, 1997). Menurut Smith dan Read (1997), peranan mikoriza dalam transformasi unsur hara P yang terpenting

1. Pengambilan dan translokasi unsur
2. Absorpsi P non labil tanah (adanya enzim fosfatase)
3. Sebagai penyimpan dan transfer P ke akar tanaman

Mikoriza membutuhkan P sebagai sumber energi, sedangkan tanaman membutuhkan P secara fisiologis untuk metabolismenya. Dengan adanya mikoriza maka akan meningkatkan konsentrasi P di daerah perakaran tanaman, dengan melepaskan ikatan P yang terfiksasi menjadi P yang lebih tersedia (Siverding, 1991). Menurut Smith dan

read (1997), bahwa jumlah P yang diserap dari tanah dan ditransfer ke tumbuhan merupakan hasil dari tiga mekanisme berikut:

1. Penyerapan P oleh hyfa dari tanah
2. Penyerapan P sepanjang hyfa
3. Transfer p dari hyfa ke tanaman melalui daerah interface antara cendawan dan tanaman.

Pengolahan Fosfat Alam untuk Industri pupuk

Batuan fosfat untuk industri dihasilkan dari aktivitas penambangan dan melalui proses metalurgi biji tambang penghasil P. Fosfat alam juga mengandung berbagai mineral dan unsur-unsur ikutan. Dalam proses penambangan batuan fosfat, unsur-unsur ikutan dan mineral lainnya tidak dapat direduksi seluruhnya. Batuan fosfat yang sudah diproses selalu masih mengandung silica, mineral liat, kalsit, dolomit, serta hidrat oksida Al, dan Fe dalam berbagai konsentrasi dan sangat bervariasi. Komponen ikutan baik mineral maupun senyawa-senyawa tersebut sangat menentukan kualitas fosfat alam bila digunakan secara langsung (UNIDO and IFDC, 1998). Menurut Hommand dan Day (1992), terdapat kurang lebih tiga ratus jenis fosfat alam yang diperdagangkan di dunia berdasarkan perbedaan kualitasnya.

Pengolahan dan peningkatan mutu fosfat alam dilakukan dengan berbagai macam cara yang sangat tergantung dari jenis batuan fosfat itu sendiri maupun dari jenis produk yang diinginkan, misalnya jenis batuan fosfat "*land pebble*". Pengolahannya tidak sama dengan jenis batuan fosfat dari "*Soft phosphatic marls*" (Ardha, 1991). Secara umum ada 3 (tiga) cara pengolahan yaitu: pengolahan dengan cara "*physical treatment*", "*Chemical treatment*" dan "*electric furnace treatment*".

Pengolahan secara fisik dimaksudkan untuk memperoleh bahan baku pembuatan pupuk atau untuk mendapatkan bahan makanan tambahan hewan. Pengolahan secara kimia untuk memperoleh hasil olahan pupuk buatan. Pengolahan dalam tanur listrik untuk memperoleh produk element fosfor. Berikut ini dijelaskan beberapa cara pengolahan batuan fosfat yang mungkin biasa dilakukan antara lain (Permana, dkk, 1989)

- a. Cara pengeringan dan penggerusan. Cara ini khusus dilakukan untuk batuan fosfat berkadar P sangat tinggi.
- b. Pencucian dengan air, dilakukan untuk batuan fosfat yang mengandung Lumpur halus.
- c. Pencampuran, bertujuan memanfaatkan batuan fosfat kadar rendah yang dicampur dengan batuan fosfat kadar tinggi,

sehingga memperoleh produk yang masih memenuhi persyaratan ekonomis.

- d. Flotasi, teknik ini umumnya dilakukan untuk batuan fosfat yang mengandung mineral apatit atau choloparit dengan kolektor anionic. Sedangkan mineral ikutannya dapat diapungkan dengan kolektor kationik.
- e. Kalsinasi, umumnya dilakukan untuk batuan fosfat yang mengandung elemen-elemen organik, fluor dan karbon. Dengan pembakaran sekitar 900°C, elemen-elemen organik akan hilang sehingga kadar fosfat meningkat. Cara ini memerlukan batuan fosfat yang mengandung kadar Al₂O₃ dan Fe₂O₃ kurang dari 4%.
- f. Pelarutan dengan HCl adalah untuk mengurangi kadar MgO dan CO₂. Misalnya untuk jenis fosfat dari CaCO₃. Ca₃(PO₄)₂ dilarutkan dalam HCl encer akan timbul reaksi kimia sebagai berikut:

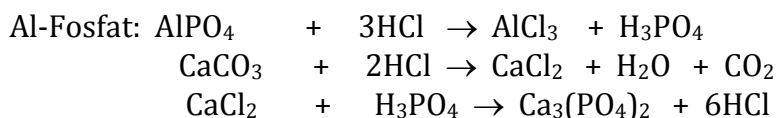
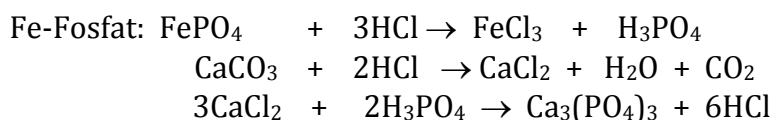
$$3\text{CaCO}_3 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}^+ + 3\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

$$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 + 6\text{HCl} \rightarrow 3\text{Ca}^{2+} + 6\text{H}^+ + 6\text{Cl}^- + 2\text{PO}_4^{3-}$$
 Dengan memakai HCl yang stoikhiometrik diharapkan hanya reaksi pertama saja yang terjadi. Dengan keluarnya CO₂ sebagai gas, kadar P₂O₅ dari batuan fosfat dapat ditingkatkan.

g. Volatilisasi

Proses ini cocok untuk mengurangi elemen Al, Fe dan Si tanpa kehilangan P₂O₅ dimana Fe dan Al diubah menjadi AlCl₃ dan FeCl₃ yang bersifat volatile.

Reaksinya adalah sebagai berikut:



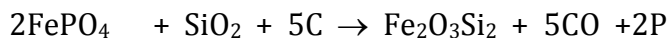
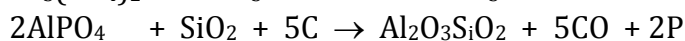
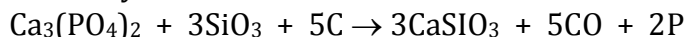
Batuan fosfat berukuran sekitar 65 mesh dimasukkan ke dalam dapur klin dengan suhu sekitar 400°C. Uap HCl dihembuskan ke dalam klin sehingga terbentuk senyawa klorida yang terpisah dari fosfatnya. Bagaimanapun secara teknis cara ini sulit ditangani karena prosesnya sangat kerosif dan biayanya mahal.

h. Proses reduksi dalam dapur listrik.

Dalam hal ini batuan fosfat jenis apapun dapat diolah untuk dapat diambil elemen fosfornya. Proses pengambilan elemen fosfor ini adalah proses reduksi pada suhu tinggi dimana

senyawa fosfat direduksi dengan unsur karbon (kokas), ditambah dengan flux (SiO_2). Unsur fosfat dapat dilepas dari ikatannya pada temperatur sekitar 1600°C (Komaruddin, 1974).

Reaksinya adalah:



Gas fosfor dapat ditangkap dengan tabung air, sehingga terbentuk kristal-kristal fosfor. Beberapa tahap pengolahan batuan fosfat yang dilakukan oleh Pusat Penelitian dan Penerapan Teknologi Mineral adalah sebagai berikut:

1. Pencucian

Pencucian dimaksudkan untuk menghilangkan Lumpur halus (*slimes*) yang diperkirakan banyak mengandung Al_2O_3 dan Fe_2O_3 . Pencucian dilakukan dengan alat scrubber dengan persen padatan 30% diaduk selama 15 menit dengan putaran pengaduk 600 rpm. Kedalam 500cc pulp ditambah sebanyak 5 cc larutan NaOH 1%. Hasil pencucian diayak dengan saringan 35 mesh dan 150 mesh.

2. Klasifikasi

Upaya pemisahan antara fosfat yang berkadar tinggi dengan yang berkadar rendah dengan cara pengayakan. Dengan pengayaan diharapkan kadar P_2O_5 maupun pengotor Al_2O_3 dan Fe_2O_3 terdistribusi merata untuk setiap fraksi ukuran. Hal ini menunjukkan bahwa pengotor Al_2O_3 dan Fe_2O_3 adalah sebagai mineral yang berasosiasi di dalam mineral fosfat.

3. Flotasi

Proses flotasi dimaksudkan untuk meningkatkan kadar fosfat dan menurunkan kandungan unsure-unsur pengotor seperti Al_2O_3 dan Fe_2O_3 .

Proses pembakaran atau kalsinasi adalah untuk menghilangkan garam-garam karbonat, dan zat-zat organik, serta meningkatkan aktivasi mineralnya. Hasil penelitian Musaad (1996) menunjukkan bahwa fosfat alam asal Ayamaru Sorong yang dikalsinasi pada suhu 600°C , menyebabkan terjadi peningkatan kelarutan fosfor lima kali lebih besar dibandingkan tanpa kalsinasi.

6. Pupuk Fosfat Papua Nutrient

Pupuk fosfat Papua Nutrient adalah produk inovasi dalam rangka mengatasi keterbatasan lahan dan tanah pertanian yang ada. Pupuk ini menjadi salah satu solusi dan telah diaplikasikan dalam bidang pertanian dan perkebunan, terutama di Papua. Bab ini mengulas pupuk inovatif ini.

6.1. Pupuk Fosfat-Plus

Universitas Papua memiliki teknologi formula pupuk yang berbasis bahan baku lokal. Pupuk tersebut diformulasi sehingga menghasilkan nutrisi lengkap untuk memenuhi kebutuhan tanaman. Ujicoba Pupuk Papua Nutrient telah dilakukan di beberapa lokasi di Papua dan Papua Barat, dengan teknologi yang telah dipatenkan. Hak Paten dari Kementerian Hukum dan Hak Asasi Manusia RI tertanggal 3 Februari 2012, dengan No. ID P0030110. PUPUK "PAPUA NUTRIENT" lahir dari hasil penelitian di Laboratorium Tanah UNIPA Manokwari dan UNPAD Bandung. Papua Nutrient adalah gizi tanaman yang lengkap, pertama kali diproduksi menggunakan bahan baku asal Ayamaru Maybrat dan Manokwari melalui kegiatan penelitian selama 15 tahun.

Berdasarkan berbagai hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan pupuk kompos dapat meningkatkan produksi tanaman dan lebih ramah lingkungan tetapi dibutuhkan dalam jumlah banyak (5 – 40 ton ha⁻¹). Pilihan ini kurang ekonomis dan tidak dapat dipenuhi oleh petani secara mandiri terutama di daerah yang infrastruktur masih terbatas seperti di Papua dan Papua Barat. Solusinya adalah memodifikasi penggunaan pupuk organik disertai penggunaan pupuk cair lengkap berbasis organik yang dihasilkan oleh Universitas Papua.

Saat ini Universitas Papua, memiliki teknologi untuk memproses pupuk padat maupun cair berbasis bahan baku lokal. Pupuk yang akan diproduksi melalui program IbIKK ini memiliki beberapa keunggulan, yakni: berbasis bahan baku lokal organik, formulanya dapat disesuaikan dengan kondisi tanah dan jenis tanaman, sehingga akan lebih efisien dan tepat sasaran.

Dampak dan manfaat IbIKK dari aspek sosial ekonomi masyarakat terkait dengan pemecahan masalah pertanian di Papua Barat. Salah satunya adalah penyediaan pupuk sebagai salah satu sarana produksi pertanian. Pembangunan sektor pertanian dan perkebunan di Provinsi Papua dan Papua Barat mengalami berbagai kendala yaitu:

- (1). Wilayah Papua yang sangat luas dan kondisi geografis yang sulit dijangkau serta minimnya infrastruktur menyebabkan tingginya biaya transportasi. Hal ini menyebabkan petani memperoleh sarana produksi pertanian seperti pupuk sangat mahal.
- (2). Lahan-lahan pertanian di Papua dan Papua Barat umumnya tidak subur, karena tanah terbentuk dari batuan non vulkanik dan vulkanik tua, yang ditunjang oleh tingginya curah hujan menyebabkan pencucian basa-basa secara intensif sehingga pH tanah umumnya rendah yang berindikasi rendahnya serapan unsur hara oleh tanaman.
- (3). Penyediaan pupuk yang sangat terbatas, minimnya tenaga penyuluh dan rendahnya kemampuan petani dalam mengadopsi teknologi, maka diperlukan pendekatan dengan mengacu pada konsep pembangunan pertanian berbasis sumberdaya lokal dengan teknologi masukan rendah (*Low Input Technology*). Teknologi pemanfaatan bahan baku lokal untuk dijadikan pupuk merupakan solusi yang lebih tepat karena petani dapat memperoleh pupuk tepat waktu dengan harga yang terjangkau.
- (4). Belum adanya pupuk pengganti ketika terjadi kelangkaan pupuk subsidi terutama di daerah-daerah sentra pertanian.
- (5). Tingginya ketergantungan petani terhadap pupuk kimia yang disediakan oleh pemerintah (pupuk subsidi) maupun yang dijual bebas di pasaran (pupuk non subsidi), dapat mengakibatkan penurunan kualitas tanah pertanian di Tanah Papua, sehingga produksi akan stagnan meskipun dilakukan pemupukan.
- (6). Lemahnya modal petani dalam penerapan pemupukan berimbang sehingga produksi dan kualitas hasil panen terutama padi, jagung, dan kedelai relatif rendah dan selalu di bawah produksi rerata nasional.

- (7). Kebutuhan pupuk majemuk (hara makro dan mikro) untuk meningkatkan produksi tanaman pertanian dan perkebunan belum terpenuhi.
- (8). Hasil pertanian dan perkebunan tidak menentu akibat dampak perubahan iklim dan ketidakseimbangan nutrisi tanaman. Hasil pengamatan di Lapangan menunjukkan bahwa salah satu penyebab rendahnya produksi pertanian di Papua adalah rendahnya kesuburan tanah dan tidak dilakukan pemupukan berimbang, misalnya penggunaan pupuk organik dan anorganik.

6.2. Pembuatan Pupuk Fosfat Papua Nutrient

Keterbatasan bahan baku pupuk terutama batuan fosfat di Indonesia, menyebabkan Industri pupuk fosfat masih sangat tergantung pada sumberdaya alam maupun teknologi dari negara lain. Pupuk fosfat yang dihasilkan dari proses industri fosfat di Petro Kimia berupa SP-36 dan Phonska (Purnama, 2004). Menurut Senesi dan Polemio (1981), semua produk pupuk kimia mengandung unsur-unsur ikutan seperti Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Al dengan konsentrasi yang berbeda-beda dan pada konsentrasi tertentu akan berdampak buruk bagi lingkungan.

Bahan baku utama produk pupuk melalui program IBIKK Pupuk ini adalah: kotoran ternak, kompos, gambut, limbah rumah tangga, limbah hasil laut, dan Tanah Endapan Fosfat Krandalit (TEFK) yang terdapat di Kabupaten Maybrat. Tanah Endapan Fosfat Krandalit seluas lebih dari 100.000 hektar sangat berpotensi digunakan sebagai bahan baku pupuk fosfat cair. Sebagian besar limbah perkebunan seperti kulit buah kakao, kulit buah kopi, pelepah dan tandan kosong kelapa sawit, pelepah dan limbah sabut kelapa, pelepah pohon pisang merupakan bio-massa yang sangat berpotensi untuk diproses menjadi pupuk organik. Jika kedua bahan baku tersebut diproses dan dihasilkan pupuk, maka kebutuhan pupuk di Provinsi Papua dan Papua Barat dapat dipenuhi, lebih ekonomis, dan mengurangi subsidi pemerintah.



Gambar 6.1. Bahan baku TEFK

Efisiensi pemupukan sangat ditentukan oleh jenis pupuk dan tanaman. Penyediaan pupuk melalui formulasi yang tepat agar diperoleh nutrisi seimbang dan takaran yang sesuai untuk tanaman pangan utama seperti padi dan ubi-ubian, kacang-kacangan terutama kedelai, tanaman hortikultura (sayuran dan buah-buahan), dan tanaman perkebunan membutuhkan formula pupuk dengan keseimbangan nutrisi yang berbeda terutama imbang N, P, K, dan bahan organik. Penyediaan pupuk di tingkat petani maupun distributor merupakan peluang bisnis yang sangat prospektif untuk dikembangkan. Melalui program IbIKK Pupuk Fosfat-Plus Universitas Papua dalam jangka panjang diharapkan dapat menyediakan pupuk alternatif bagi kebutuhan petani untuk meningkatkan produktivitas lahan dan produksi pertanian dengan harga yang terjangkau, mudah diperoleh petani, dapat tersedia setiap saat, penggunaannya lebih tepat waktu, dosis, dan lokasi sehingga pendapatan petani dapat meningkat.

Pada tahun pertama IbIKK Pupuk Fosfat-Plus Universitas Papua akan memproduksi pupuk organik granuler dengan kapasitas produksi 1 ton dan 100 Liter pupuk organik cair untuk digunakan pada kelompok tani sayuran di Manokwari. Pada tahun kedua, IbIKK akan melakukan optimalisasi produksi dan penentuan formula untuk tanaman padi dan kedelai di daerah Transmigrasi Prafi Manokwari dengan kapasitas produksi 2 ton pupuk organik granuler dan 500 L pupuk organik fosfat cair. Pada tahun ke-3, kapasitas produksi dapat ditingkatkan dan dilakukan ekspansi pemasaran ke beberapa wilayah Kabupaten lainnya seperti Kabupaten Sorong, Fakfak, Kaimana, Teluk Bintuni, dan Teluk Wandama.

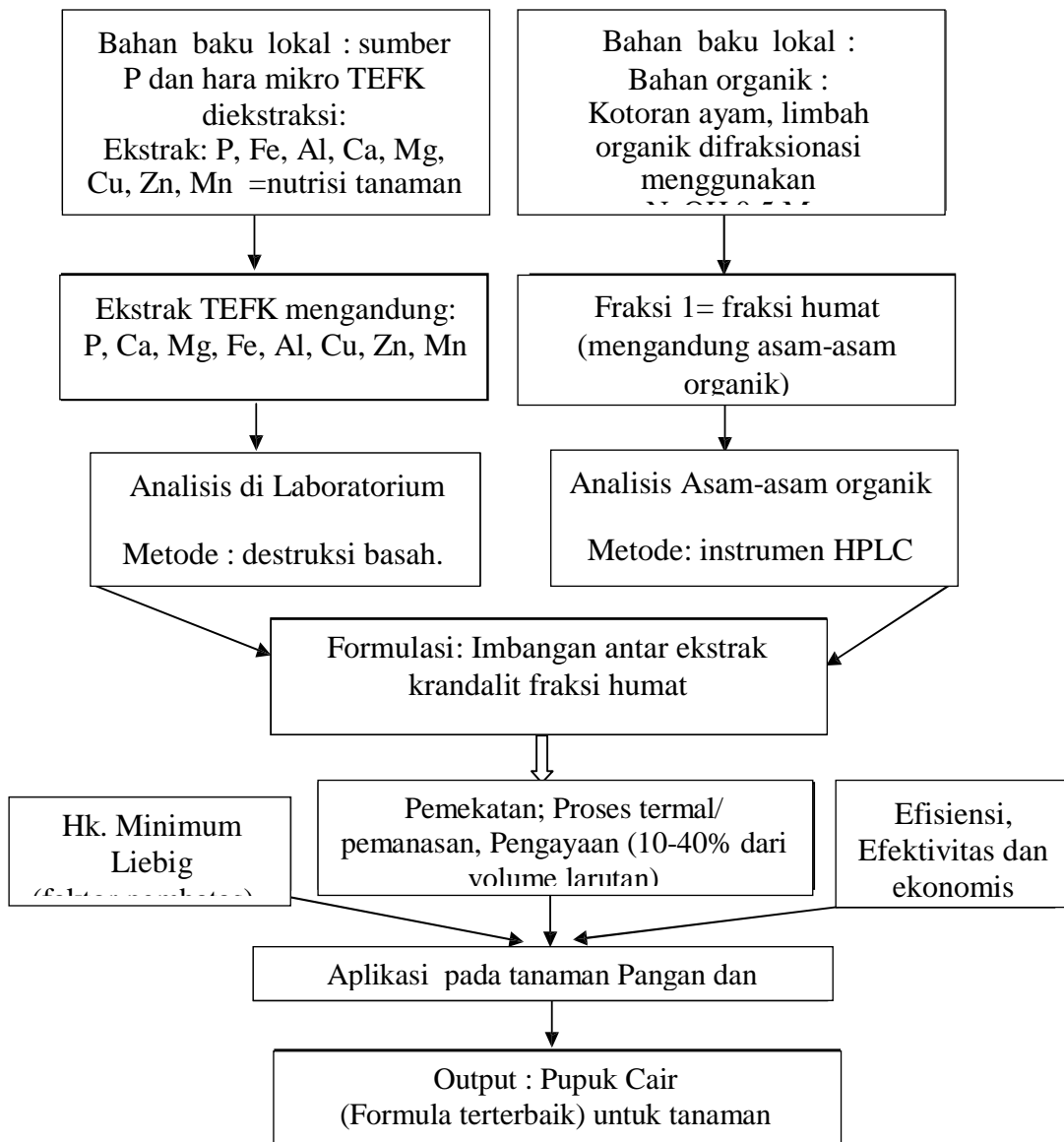


Gambar 6.2. Alat Granulator untuk pembuatan pupuk fosfat granul

Melalui program IBIKK telah dilakukan identifikasi jenis sisa limbah organik dari pasar, rumah tangga dan lahan petani, kotoran ternak yang dapat digunakan sebagai bahan baku. Umumnya sisa limbah pasar dapat berupa sisa potongan sayuran yang tidak dijual, kulit pisang, jagung, dan jenis limbah sayuran lainnya. Selain itu limbah pasar lainnya yang dapat digunakan adalah sisa dari bagian ikan yang tidak dijual dan dikonsumsi seperti sirip, insang dan darah ikan. Limbah-limbah ini dikumpulkan dalam ruang/bak penampung kemudian dilakukan pencampuran dengan fosfat alam krandalit termal. Dalam proses pencampuran digunakan beberapa formulasi untuk pengayaan unsur hara. Setelah dilakukan pencampuran kemudian dilakukan proses pengomposan selama 4–6 minggu, dan dilanjutkan dengan granulasi. Proses granulasi dilakukan untuk membentuk bahan organik menjadi bentuk granular. Setelah pupuk dalam bentuk granular dihasilkan, kemudian dilakukan pengepakan (*packing*). Kemasan pengepakan menggunakan plastik berukuran 5-10 kg, dan selanjutnya dilakukan promosi dan penjualan. Secara sederhana bagan alir proses produksi dapat dilihat pada Gambar 6.3 dan 6.4.



Gambar 6.3. Bagan alir proses produksi



Gambar 6.4. Bagan alir proses produksi untuk memperoleh formula Pupuk Cair

6.3. Spesifikasi Produk

Penelitian yang telah dilakukan di Universitas Papua sejak tahun 1990 telah menghasilkan formula pupuk fosfat cair maupun padat. UNIPA telah memiliki teknologi formulasi pupuk yang berbasis bahan baku lokal. Pupuk tersebut diformulasi sehingga menghasilkan nutrisi lengkap untuk memenuhi kebutuhan tanaman sesuai jenis tanaman dan

kondisi kesuburan tanah. Pupuk tersebut diberi merek Papua Nutrient. Proses produksi pupuk fosfat padat dan cair dari Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru dan Fraksi Bahan Organik telah memperoleh sertifikat paten pada tahun 2012 (ID P00300110). Pupuk tersebut sedang disosialisasikan penggunaannya ke masyarakat maupun instansi terkait. Berdasarkan uraian tersebut, terlihat jelas bahwa penyediaan pupuk dari bahan baku lokal dan berbasis organik memiliki potensi untuk dikembangkan dan dapat dijadikan unit usaha yang sangat prospektif untuk menunjang pembangunan pertanian di Papua dan Papua Barat. Produk pupuk yang dihasilkan UNIPA dan bahan baku mineral yang akan dikembangkan melalui program IBIKK disajikan pada Gambar 6.5-6.7.



Gbr 6.5a. Pupuk Fosfat_Plus (granul) b. Pupuk Fosfat_Plus (cair)

Melalui program IBIKK dibangun unit produksi pupuk berbasis bahan baku lokal yang dapat menunjang kebutuhan petani untuk meningkatkan produksi pertanian. Diharapkan IBIKK Pupuk ini dapat menjadi unit usaha untuk dikembangkan lebih lanjut menjadi industri pupuk skala menengah sehingga dapat mempercepat pemanfaatan salah satu hasil penelitian dari UNIPA. Pada tahun kedua kegiatan IBIKK ini ada beberapa permasalahan yang perlu dibenahi yaitu: (1) Kepastian pasokan bahan baku dari Kabupaten Maybrat. Kelancaran pasokan bahan baku dapat diperoleh jika ada kerja sama dengan instansi terkait yaitu Bappeda, Dinas Pertanian, Dinas Perindustrian dan Perdagangan Kabupaten Maybrat dan pemilik hak ulayat atas tanah tersebut. Substitusi bahan baku dapat dilakukan dengan menggunakan limbah hasil laut seperti tulang ikan, dan fosfat syntetis. Hal ini dapat dilakukan karena kebutuhan bahan baku ini hanya mencapai 10-20%.



Gbr.66. Pengujian TEFK Ayamaru pada Ultisol dan Inceptisol

6.4. Pemasaran

Permintaan pupuk terus meningkat seiring dengan meningkatnya produk pertanian dan perkebunan, baik karena program intensifikasi maupun ekstensifikasi. Master Plan Percepatan Pembangunan Ekonomi Indonesia (MP3EI), menempatkan Provinsi Papua dan Papua Barat dalam koridor enam, yaitu salah satu wilayah penghasil pangan nasional. Dengan demikian penyediaan industri pupuk baik skala kecil maupun menengah di Papua sangat diperlukan untuk menunjang program tersebut. Ketersediaan bahan baku berupa Tanah Endapan Fosfat Krandalit (TEFK) di Kabupaten Maybrat dan bahan organik yang melimpah sangat menunjang keberhasilan dan keberlanjutan usaha IBIKK. Produk dari IBIKK ini telah dipasarkan dengan konsumen sasaran: 1). konsumen pencinta tanaman hias; 2) petani lokal; 3). Petani Transmigrasi di wilayah Papua Barat; 4). Perkebunan Kelapa Sawit. Instansi teknis: Dinas Pertanian dan Perkebunan Kabupaten/Kota di Papua Barat.

Hilirisasi Produk

Seperti telah diketahui bahwa pupuk mutlak diperlukan di semua wilayah di Indonesia karena merupakan salah satu sarana produksi pertanian yang sangat penting. Nutrisi tanaman yang bersumber dari pupuk padat maupun cair perlu dikembangkan dari sumberdaya lokal organik maupun anorganik yang terdapat di Papua Barat. Hal ini disebabkan kesuburan tanah pertanian di Papua Barat umumnya rendah karena didominasi oleh tanah Ultisols dan Inceptisol yang berasal dari bahan induk nonvulkanik yang relatif miskin unsur hara. Dampak pemanasan global (*global warming*) juga perlu diantisipasi dengan cara peningkatan produksi tanaman pangan secara berkelanjutan terutama pada musim kemarau untuk mencegah kerawanan pangan di daerah. Penggunaan pupuk cair pada musim kemarau diduga lebih efektif dibandingkan dengan penggunaan pupuk padat. Peningkatan efisiensi penggunaan pupuk yang didasarkan atas kualitas lahan, jumlah unsur hara yang dibutuhkan dan penambahan unsur hara yang diperlukan tanaman diharapkan memberikan dasar rekomendasi yang lebih rasional dan bersifat spesifik lokasi. Hingga saat ini belum ada kajian menentukan formula pupuk untuk berbagai jenis tanaman di Provinsi Papua Barat.

Teknologi pemanfaatan bahan baku lokal yang dapat diproses menjadi pupuk merupakan penelitian yang strategis dalam upaya peningkatan produksi tanaman seperti padi, jagung, kedelai, dan lainnya. Penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa endapan fosfat krandalit, gambut dan kotoran ternak dapat diproses menjadi pupuk padat dan cair yang menghasilkan nutrient tanaman yang lengkap, mengandung beberapa senyawa organik yang sangat diperlukan tanaman dan dapat memperbaiki kesehatan tanah serta meningkatkan hasil tanaman sangat signifikan (Musaad, 2009).

Pemupukan berimbang sangat diperlukan pada tanah-tanah dengan kesuburan yang rendah. Bahan organik, unsur hara P, Fe, Zn dan B diduga menjadi pembatas utama hasil tanaman pangan di Tanah Papua. Ekstrak krandalit yang kaya akan P dan hara mikro Fe, Cu, Zn, dan Mn dapat digunakan sebagai nutrisi tanaman, namun diperlukan modifikasi dengan fraksi bahan organik agar lebih ramah lingkungan. Imbangan yang tepat antar ekstrak krandalit dan fraksi organik untuk memenuhi kebutuhan tanaman dapat diperoleh melalui kajian pemanfaatan TEFK dan bahan organik dan uji multilokasi di sentra-sentra produksi pertanian di tanah Papua maupun di wilayah lainnya yang kesuburan tanahnya rendah.

Sejalan dengan upaya peningkatan produksi pangan, kebutuhan pupuk juga meningkat sangat pesat. Penggunaan pupuk NPK pada subsektor tanaman pangan secara nasional hanya mencapai 197.000 ton pada tahun 1970. Pada tahun 1980 penggunaan pupuk meningkat menjadi 912.000 ton

atau sekitar lima kali lipat dari penggunaan pada tahun 1970. Penggunaan pupuk N,P,K pada tahun 2008 lebih dari 5 juta ton. Jumlah pupuk SP-36 yang disubsidi oleh pemerintah pada tahun 2007 sebanyak 800.000 ton dan masih jauh dibawah kebutuhan yang mencapai 1,4 juta ton karena bahan bakunya masih diimpor.

Keterbatasan bahan baku pupuk terutama batuan fosfat, menyebabkan Industri pupuk fosfat di Indonesia masih sangat tergantung pada sumberdaya alam maupun teknologi dari negara lain. Pupuk fosfat yang dihasilkan dari proses industri fosfat berupa SP-36 dan Phonska (Purnama, 2004). Menurut Senesi dan Polemio (1981), semua produk pupuk kimia mengandung unsur-unsur ikutan seperti Ni, Pb, Cu, Zn, Fe, Al dengan konsentrasi yang berbeda-beda dan pada konsentrasi tertentu akan berdampak buruk bagi lingkungan.

Perbaikan teknologi terus-menerus dilakukan di negara-negara maju untuk menghasilkan pupuk fosfat yang lebih ekonomis, konsentrasi unsur pupuk lebih tinggi dan berkualitas lebih baik melalui proses-proses kimia. Pupuk-pupuk kimia terbaru juga telah diproduksi melalui upaya penelitian di bidang kimia pupuk, misalnya pengembangan pupuk-pupuk fosfat cair atau suspensi (Ronald, *et al.*, 1997). Penelitian-penelitian seperti ini masih sangat langka dilakukan di Indonesia terutama di Kawasan Timur, karena kurangnya informasi tentang sumberdaya alam khususnya fosfat alam di luar Pulau Jawa, keterbatasan tenaga peneliti dan kendala lainnya. Efisiensi pemupukan sangat ditentukan oleh jenis pupuk dan tanaman. Penyediaan pupuk melalui formulasi yang tepat agar diperoleh nutrisi seimbang dan takaran yang sesuai untuk tanaman merupakan penelitian yang sangat penting karena minimnya pengetahuan petani dan keterbatasan ketersediaan pupuk di Papua.

Menurut Fransisco *et al.*, (2007), mineral fosfat krandalit tidak sesuai digunakan dalam industri pupuk karena proses asidulasi menghasilkan residu yang banyak tetapi dapat digunakan langsung setelah diaktivasi dengan perlakuan termal. Perlakuan termal pada suhu 600-700°C merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kelarutan P pada TEFK (Musaad, 1996), sedangkan untuk mengatasi kendala unsur-unsur Al dan Fe agar tidak berdampak toksik bagi tanaman adalah dengan input bahan organik. Komponen anorganik hasil proses termal dari TEFK adalah oksida-oksida P_2O_5 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO , CaO , SrO , dan NiO . Oksida-oksida CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SrO lebih mudah terhidrolisis menghasilkan basa-basa. Oksida P_2O_5 menghasilkan orthofosfat yang langsung dapat diserap tanaman, sedangkan oksida Fe_2O_3 , Al_2O_3 , dan NiO relatif lebih sulit terhidrolisis. Perbedaan kelarutan ini memberikan peluang pemisahan fosfat dari TEFK dengan cara ekstraksi sehingga TEFK dapat digunakan lebih efisien dan efektif. Efisiensi penggunaan TEFK sebagai pupuk melalui ekstraksi dan

dimodifikasi dengan substrat organik diharapkan dapat memperkecil dampak lingkungan pada lokasi cadangan bila dilakukan eksploitasi langsung.

Perlakuan ekstrak TEFK termal sebagai sumber fosfat harus disertai dengan pemberian bahan organik untuk mengantisipasi dampak kelarutan logam-logam Al dan Fe yang terkandung dalam ekstrak TEFK termal terhadap tanaman. Dalam kajian bahan organik tanah diperlukan pemisahan bahan organik tersebut dari matriks mineral liat dan sesquioksida-sesquioksida dan juga didispersikan dalam larutan (Joetono, 1993). Cara umum yang dilakukan dalam pemisahan bahan organik adalah fraksionasi. Fraksi (bagian) yang tidak terdispersi oleh daya kilasi pyrofosfat dan oleh daya pemutusan ikatan hidrogen pada pH yang tinggi dikenal sebagai humin. Bahan-bahan yang terdispersi dan dapat diendapkan pada pH yang rendah dikenal sebagai fraksi asam-asam humat, sedangkan bahan yang tetap berada dalam larutan pada pH yang rendah dikenal sebagai fraksi asam-asam fulvat. Bahan humat dan fulvat lebih efisien digunakan pada tanaman dibandingkan dengan bahan organik segar karena diperlukan dalam jumlah yang lebih sedikit, lebih reaktif dalam penyediaan hara serta interaksinya dengan substansi anorganik di dalam tanah sangat penting.

Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa kelarutan P pada TEFK dapat ditingkatkan melalui proses termal pada suhu 600-700°C. dan pemisahannya dapat dilakukan dengan menggunakan HCl konsentrasi rendah. Hasil penelitian tersebut membuktikan bahwa pemberian ekstrak TEFK termal berpengaruh lebih baik terhadap pertumbuhan tanaman jagung yang ditanam pada tanah mineral masam Humic Hapludults di Sumedang. Antisipasi dampak pengaruh Al dan Fe terlarut terhadap tanaman dilakukan dengan menggunakan fraksi humat dari pupuk kotoran ternak.

7. KESIMPULAN

Beberapa kesimpulan yang dapat dihasilkan dari tulisan ini adalah sebagai berikut:

1. Fosfat alam sebagai salah satu sumberdaya alam sangat bermanfaat dalam bidang industri non pertanian maupun pertanian sehingga perlu dikelola secara tepat dan efisien karena sumberdaya ini tidak dapat diperbaharui.
2. Potensi fosfat alam di Indonesia belum dapat diketahui secara pasti, namun diperkirakan lebih dari 50 juta ton yang tersebar di berbagai daerah.
3. Kualitas fosfat alam di Indonesia sangat beragam, dan umumnya berkualitas rendah karena tingginya kadar Al, dan Fe.
4. Pemanfaatan fosfat alam secara langsung sebagai pupuk fosfat perlu dimodifikasi dengan penambahan bahan organik, penggunaan mikroorganisme dan proses termal.
5. Diperlukan kajian-kajian yang intensif untuk memanfaatkan fosfat alam di Indonesia secara lebih efisien dan berkelanjutan sesuai kondisi setempat.

Identifikasi potensi fosfat alam di seluruh Indonesia harus dilakukan untuk memperoleh data yang akurat. Kajian tentang sifat dan karakteristik fosfat alam di Indonesia serta teknologi pemanfaatannya perlu mendapat perhatian.

Daftar Pustaka

- Andregg, J.C. and Nylor, D.V. 1988. Phosphorus and pH Relationship in An Acid Soil with Surface and Incorporation Organic Amandaments. *Plant and Soil* pp. 273 – 278.
- Anon, 2000. Mineral data. <http://webmineral.com/data/crandallite.shtml>.
- Adha. N. , Sumara. T. , Purnama, H. , Rasyad. 1981. *Upaya Peningkatan Mutu Fosfat dari Batuan Fosfat Kadar Rendah Cijulang – Ciamis*. Tim Pengkajian Fosfat Proyek Pengembangan Teknologi Pengolahan Bahan Galian Pusat Pengembangan Teknologi Mineral. Bandung. h. 23.
- Barber, S.A. 1984. Soil Nutrient Bioavaibility A Mechanistich. A Wiley Interscience Publication. John wiley dan Son. United States of America. Pp.201-202.
- BPS, 2012.Berita Resmi Statistik. No.43/07/ThXV,2 Juli 2012. www.bps.go.id.brs-file. Diakses: 13-01-2013.
- BPS, 2006.Angka Tetap Tahun 2005 dan Angka Ramalan II Tahun 2006 Produksi Tanaman Pangan. Badan Pusat Statistik, Jakarta.
- Briendley, G.W; Brawn, G. 1980. Cristal Structure of Clay Minerals and Their X-Ray Identification. Mineralogical Soc. Queens gate London. Pp 234-238.
- Busman, L.Lamb, J; Randall, G; Rehm, G; Schmitt, M. 1998. The Nature of Phosphorus in Soils. Phosphorus in The Agricultural Environment. University of Minnesota.
- Bisri U dan Permana 1991. *Bahan Galian Fosfat*.Direktorat Jenderal Pertambangan Umum. Pengembangan Teknologi Mineral. Bandung. h. 1-6.
- Brady, E.J. 1992. *General Chemistry*. Principle and Structure. New York. pp. 780-783.
- Catchart, J.B. 1980. World Phosphate Reserves and Resources. *In The Role of Phosphorus in Agriculture*. Proceeding of a Symposium Held 1-3 June.1976.
- Chien, S.H., and Hammond,L.L. 1977. A Comparison of Various Laboratory Methods for PredictingThe Agronomic Potential of

- Phosphate Rock for Direct Application. *Soil Sci. Am. J.* 42. pp. 935-939.
- Cohen, E. and Hammound, N.S. 1979. Low Temperature Roasting in Upgrading The non Oxidiced Phosphorities of Abu Tartur Plateau (Western Desert, Egypt). In *Mineral Prossessing. Proceedings Part B*. ESPC. Amsterdam. PWN-Polish Scientific Publishers. Pp. 1828-1837.
- Chiend and Hummond. 1978. Sale and Mokwunye, 1993. Adressing The P Constraint In Tropical Acid Soils. www.fao.org/docrep.html.6/02/2005.
- Egawa, T. 1982. *Recycling of Phosphorus in Agriculture*. Tech Bull. No. 69. Aspa. Taiwan. Pp. 16-18.
- FAO. 1995. Phosphorus in The Soil-Plant System. Use Phosphate Rock for Sustainable Agriculture. www.fao.org/docrep.html.6/02/2005.
- Fenster, W.E and Leon, L.A. 1986. Utilization of Phosphate Rock in Tropical Soils of Latin America. In *Seminar on Phosphate Rock for Direct Application*. IFDC. pp 174-175
- Goenadi, D.H. Siswanto dan Y.Sugiarto. 2000. Bioactivation of Poorly Soluble Phosphate Rock with a phosphorus-Solubilizing Fungus. *Soil Sci. Soc.Am.J.*64:927-932.
- Hong, G.B. 1978. *Industri Pupuk*. Hasil-Hasil Simposium Fosfat Alam. Jakarta. h.2-6
- Khasawneh, F.E. and Doll, E.C. 1978. The Use of Phosphate Rock fo Direct Application to Soils, *Adv. Agron.* P 159-162
- Lai. 2000. The Need for Sustainable Development. www.fao.org/docrep.html.6/02/2005.
- Lange, M., Inanova, 1991. *Geologi Umum (terjemahan Silitonga)*. Jakarta.
- Lindsay, W. L., and vlek, P.L.G. 1977. *Phosphate Mineral*. In Richard C. Dinaner. *Mineral in Soil Wisconsin USA*. Pp. 639-670.
- McClellan, G.H. and Wheeler. 1979. Mineralogy and Reactivity of Phosphate Rock for Direct application. In *Seminar on Phosphate rock for direct application*. IFDC. pp.57-81.
- Montulalu. M, 1996. *Ketersediaan Fosfor dan Penyerapannya oleh Tanaman Tebu Pada Tanah Oxisol Pelaihari*. (Tesis S2). Program Pascasarjana UGM (Tidak diterbitkan)
- Mohsin, M and M.M. Alfonzo. 1990. Rhizosphere Microorganism in The Soliobilization and Uptake of Phosphorus from a Venezuelan Phosphate Rock by sorgum Plants in Acid Soil. Departement of Chemistry. School of Science Universitate de Oriete, cumana 6101A, Estado Sucre, Venezuela.

- Mosse, B. 1981. Vesicular-Arbuscular Mychoriza Research for Tropical Agriculture. Res. Bull. 194. Hawaii Institute for Tropical Agriculture.
- Musaad, I. 1996. Pengaruh Pemanasan dan Pengasaman Terhadap Tahana Fosfat Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru Sorong. *Bulletin Penelitian Pascasarjana UGM. 9 (3B), Agustus 1996.h. 333-337*
- _____. I. 1999. Ketersediaan Fosfat dan Penyerapannya oleh Padi Gogo Pada Tanah Ultisol Warmare Akibat Pemberian Berbagai Sumber Fosfat dan Bahan Organik. Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih (tidak diterbitkan)
- Musaad, I. 2011. Beberapa sifat Kimia Tanah Akibat Pemberian Ekstrak Krandalit dan Fraksi Bahan Organik Pada Humic Hapludults. *Jurnal Agrotek.Vol 2. No.3. Fakultas Pertanian dan Teknologi Pertanian UNIPA Manokwari.*
- Musaad, I. 1996. Pengaruh Pemanasan dan Pengasaman terhadap Tahana Fosfat Tanah Endapan Fosfat Krandalit Ayamaru Sorong. *Bulletin Penelitian Pascasarjana UGM. 9 (3B), Agustus 1996.h. 333-337*
- Narsian, V dan Patel. 2000. *Aspergillus aculeatus* as a Rock Phosphate Solubilizer. *Soil Biology and Biochemistry* 32. 552-560.
- Permana, D. dan Bisri. U, 1991. Fosfat. *Bahan Galian Industri*. Direktorat Jenderal Pertambangan umum Pusat Pengembangan Teknologi Mineral. Bandung.
- Pujiyanto. 2001. Pemanfaatan jasad Mikro Jamur Mikoriza dan Bakteri dalam Sistem Pertanian Berkelanjutan di Indonesia: Tinjauan dari Perspektif Falsafah Science. Makalah Falsafah Sciens. Program Pascasarjana Institut Pertanian Bogor.
- Petruci, R.H. 1987. *Kimia Dasar. Terapan Modern*. Edisi Keempat Jilid I (Terjemahan Suminar). h. 172-174.
- Radjagukguk, B. 1995. Pupuk: Karakteristik-Karakteristiknya dan Cara Pemberiannya. Bahan Kuliah Kesuburan tanah (tidak diterbitkan).
- Reyders, J.J. en Schultz, F.H.R. 1958.Verslag Van en Bodemkundige Verkening in Het Ayamaroe Gebeid. *Agrarisch Proestation Bodemkundige Afdeling p. 7.*
- Ronald. D. Youz. Wesfall. D.G. Colliver. G.W. *Teknologi dan Penggunaan Pupuk*. Edisi ke 3 (Terjemahan Silitonga). Gadjah Mada Press.h. 124-126.
- Rumawas, F. 1990. Kerangka Acuan Penelitian Fosfat Alam Dalam Prosiding Lokakarya Tanah Ayamaru Sebagai Sumber Pupuk

- Fosfat*. Fakultas Pertanian Universitas Cenderawasih Manokwari (tidak diterbitkan). h. 8-10.
- Saidi, A.R. 2018. Bahan Organik Tanah. Klasifikasi, Fungsi dan Metode Studi. Lambung Mangkurat University Press.
- Sanchez, P.A. 1976. *Properties and Management of Soil in Tropics*. John Willey & Sons, in New York. Pp 62-74.
- Schroo, H. 1963. A Study of Highly Phosphatic Soils In A Karts Region of The Humid Tropics. *Neth. J. Agric. Vol. 11.pp. 210-221*.
- Senesi, N, Polemio, M. 1981. Trace Element Addition to Soil by Application of NPK Fertilizers. *Fertilizer Research* 2:289-302. The Hague. Printed in The Netherlands. Pp. 291-295.
- Siregar, Permana, Adha, N. 1989. Survei Sumber Fosfat Irian Jaya. Laporan Tehnik Penelitian (tidak diterbitkan). Direktorat Jenderal Pertambangan Umum. PPTM Bandung.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular-Arbuscular Mychoriza Management in Tropical Agrosystem. Technical Cooperation, Federal Republik of Germany.
- Smith S.E, and D.J. Read. 1997. Mychoriza symbiosis. Second Edition. Academic Press. New York. Pp 450-460.
- Stevenson, F.J. 1986. *Cyclic of Soils, Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfir, Micronutrients*. Departement of Agronomy. University of Illions. A Willey & Sons. New York.pp. 148-150.
- Subba Rao. 1982. Biofertilizer in Agriculture. Oxford and IBH Publishing Co. New Delhi, Bombay, Calcuta.
- Tan, H. 1982. Dasar-dasar Kimia Tanah (Terjemahan Goenadi). Gadjah Mada University Press. H.194-201.
- Tisdale, S.L., and W.L. Nelson. 1975. Soil Fertility and Fertilizers. Macmillan Publishing Co., Inc., New York. Pp. 694-695.
- Wiranataprawira, 2003. Pertambangan.
<http://www.unsil.net/tsm/fosfat.html>.

