

Ketersediaan P Tanah-Tanah Netral dan Alkalin

Soil P Availability in Neutral and Alkaline Soils

D. NURSYAMSI DAN D. SETYORINI¹

ABSTRAK

Ketersediaan P di dalam tanah tergantung reaksi keseimbangan antara berbagai bentuk P tanah, yakni P larut (*soluble P*), P terjerap (*P labile*), P mineral sekunder dan primer (*P non labile*), dan P organik. Penelitian yang bertujuan untuk mempelajari kadar, bentuk, dan jerapan P tanah, serta sifat-sifat tanah yang berpengaruh terhadap peubah ketersediaan P tanah-tanah netral dan alkalin telah dilaksanakan di Laboratorium Penelitian dan Uji Tanah, Balai Penelitian Tanah, Bogor. Penelitian menggunakan 91 contoh tanah lapisan atas (0-20 cm) yang bersifat netral-alkalin dan diambil dari Jawa. Contoh tanah tersebut meliputi tanah Inceptisols (13 contoh), Vertisols (47 contoh), dan Alfisols (31 contoh). Sifat-sifat tanah yang dianalisis meliputi: pH air (1:5), kadar liat (pipet), C-organik (Kjeldahl), Ca dan Mg_{did} (NH₄OAc 1 N pH=7), Al_{did} (KCl 1 M), dan P (HCl 25%, Olsen, dan Bray I). Penetapan fraksionasi P mengikuti prosedur Kuo (1996) sedangkan jerapan P menurut Fox dan Kamprath (1970). Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan pengkestrak HCl 25%, Olsen, dan Bray I, maka P tersedia di dalam tanah dari tinggi ke rendah berturut-turut adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols. Proporsi bentuk P dari tinggi ke rendah pada ketiga tanah yang diteliti adalah residu-P > Ca-P > (Fe+Al)-P > organik-P. Daya sangga, jerapan maksimum, dan konstanta energi ikatan P di tiga jenis tanah tersebut dari tinggi ke rendah adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols. Sementara itu sifat-sifat tanah yang berpengaruh nyata terhadap peubah ketersediaan P adalah kadar liat, C-organik, dan Mg_{did} tanah pada Inceptisols; kadar liat dan C-organik tanah pada Vertisols; serta pH, kadar liat, dan Ca_{did} tanah pada Alfisols.

Kata kunci : Ketersediaan P, Tanah netral, Tanah alkalin

ABSTRACT

The availability of soil P for plant growth depends on equilibrium reaction between several P forms in the soils, such as soil soluble, labile, non-labile, as well as organic P. The research that aimed to study soil P availability, form, and sorption, as well as soil properties that affect on P availability in neutral and alkaline soils was conducted in Soil Testing Laboratory, Indonesian Soil Research Institute using 91 topsoil samples (0-20 cm) which have pH neutral-alkaline taken from Java. The samples consisted of Inceptisols (13 samples), Vertisols (47 samples), and Alfisols (31 samples). Soil properties analyzed were soil pH H₂O (1:5), clay content (pipette), organic-C (Kjeldahl), exch. Ca and Mg (NH₄OAc 1 N pH=7), exch. Al (KCl 1 M), and P (HCl 25%, Olsen, and Bray I). Soil P fractionation and sorption were determined using Kuo (1996) and Fox and Kamprath (1970) procedures respectively. The result showed that according to HCl 25%, Olsen, and Bray I extractions, the availability of soil P among the soils was in order of Inceptisols > Vertisols > Alfisols. Whereas the soil P forms in tested soils was in order of

residual-P > Ca-P > (Fe+Al)-P > organic-P. Buffering capacity, maximum sorption, as well as bonding energy constant of soil P was in order of Inceptisols > Vertisols > Alfisols. Furthermore, soil properties that effected significantly on the variables of soil P availability were soil clay content, organic-C, and exch. Mg in Inceptisols; clay content and organic-C in Vertisols; as well as pH, clay content, and exch. Ca in Alfisols.

Keywords : P availability, Neutral soils, Alkaline soils

PENDAHULUAN

Hara P merupakan hara makro bagi tanaman yang dibutuhkan dalam jumlah banyak setelah N dan lebih banyak daripada K. Fosfat diperlukan oleh tanaman untuk pembentukan *adenosin di- triphosphate* (ADP dan ATP) yang merupakan sumber energi untuk proses pertumbuhan dan perkembangan tanaman (Marschner, 1997). Selain itu kecukupan P sangat penting untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangan bagian vegetatif dan reproduktif tanaman; meningkatkan kualitas hasil; dan ketahanan tanaman terhadap penyakit. Dengan demikian, pengelolaan hara P merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam meningkatkan produksi pertanian.

Selain faktor tanaman, pengelolaan hara P juga harus memperhatikan ketersediaan P di dalam tanah. Ketersediaan P di dalam tanah tergantung kepada: (1) jumlah dan jenis mineral tanah, (2) pH tanah, (3) pengaruh kation, (4) pengaruh anion, (5) tingkat kejenuhan P, (6) bahan organik, (7) waktu dan suhu, dan (8) penggenangan (Havlin *et. al.*, 1999). Hara P bersifat immobil di dalam tanah karena sebagian besar P tanah dijerap menjadi bentuk tidak tersedia bagi tanaman. Pada tanah masam seperti Ultisols dan Oxisols, P biasanya dijerap oleh Al dan Fe (kation, oksida, dan hidroksida) serta liat tanah

¹ Peneliti pada Balai Penelitian Tanah, Bogor.

(Brady, 1984; Dobermann *et al.*, 2002; dan Saleque *et al.*, 2004). Sementara itu, pada tanah netral dan alkalin seperti Alfisols dan Vertisols, P dijerap selain oleh Al, Fe, dan liat tanah juga oleh Ca (Brady, 1984; Than and Egashira, 2008).

Tanah-tanah netral dan alkalin di Indonesia umumnya termasuk ordo Aluvial (Inceptisols), Grumusols (Vertisols), Mediteran (Alfisols), dan Rendzina (Mollisols). Karakteristik utama tanah-tanah tersebut diantaranya adalah reaksi tanah netral hingga alkalin (pH=6,5-8,0). Karakteristik lain tanah-tanah tersebut umumnya mengandung mineral liat smektit (tipe 2:1) tinggi sehingga memiliki sifat-sifat vertikal. Kadar P potensial dan aktual tanah-tanah tersebut berkisar dari rendah hingga tinggi, tergantung bahan induk tanah dan tingkat pengelolaan lahan. Tanah-tanah yang banyak mengandung mineral P (apatit, fluoroapatit, dan lain-lain) dan dikelola secara intensif biasanya mengandung P tinggi. Sebaliknya tanah-tanah yang miskin mineral P dan tingkat pengelolannya masih belum intensif biasanya mengandung P relatif rendah.

Di Indonesia, penyebaran tanah-tanah tersebut di atas cukup luas, yaitu diperkirakan lebih dari 2.12 juta ha (Vertisols sekitar 2.12 juta ditambah sebagian Inceptisols, Alfisols, dan Mollisols). Tanah-tanah ini tersebar di wilayah Jawa (Jabar, Jateng, dan Jatim), Sulawesi (Sulsel, Sulteng, dan Gorontalo), dan Nusa Tenggara (Lombok) (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 2000). Tanah-tanah tersebut termasuk tanah pertanian utama di Indonesia dan umumnya dimanfaatkan untuk padi sawah irigasi dan tadah hujan, palawija, kebun campuran, tebu, tembakau, kapas, kelapa, dan hortikultura lainnya seperti mangga dan jeruk (Subagyo *et al.*, 2000).

Ketersediaan P di tanah-tanah netral dan alkalin di Indonesia ternyata masih merupakan kendala bagi pertumbuhan tanaman. Setyorini *et al.* (2005) melaporkan bahwa selain hara N, hara P juga masih menjadi faktor pembatas pertumbuhan tanaman jagung di Hapludalf Tipik (Bogor) dan

Haplustalf Tipik (Blora). Demikian pula di tanah-tanah yang berbau kapur (*calcareous soils*) di Australia, defisiensi P masih merupakan pembatas utama produksi tanaman pangan (Lombi *et al.*, 2004). Dengan demikian pengelolaan hara P merupakan faktor yang memegang peranan penting dalam meningkatkan produksi pertanian di tanah-tanah netral dan alkalin.

Berdasarkan pemikiran tersebut di atas penelitian ini bertujuan untuk mempelajari kadar, bentuk, dan jerapan P tanah, serta sifat-sifat tanah yang berpengaruh terhadap peubah ketersediaan P tanah-tanah netral dan alkalin. Informasi tersebut sangat penting dalam menentukan rekomendasi pengelolaan hara P di tanah-tanah yang diteliti.

BAHAN DAN METODE

Contoh tanah komposit lapisan atas (0-20 cm) telah diambil sebanyak 91 contoh, masing-masing 32 contoh berasal dari Jawa Barat dan Jawa Tengah dan 27 contoh dari Jawa Timur. Selanjutnya analisis kimia tanah, fraksinasi, dan jerapan P tanah terhadap contoh tanah tersebut dilaksanakan di Laboratorium Penelitian dan Uji Tanah, Balai Penelitian Tanah Bogor sejak Oktober 2007 - Mei 2008.

Pengambilan contoh tanah komposit mengikuti sebaran tanah yang tertera dalam Peta Tanah Tinjau Propinsi Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur Skala 1:250.000 (Lembaga Penelitian Tanah, 1966). Contoh tersebut merupakan bahan tanah lapisan atas dari tanah Aluvial, Grumusols, dan Mediteran (Lembaga Penelitian Tanah, 1966) atau masing-masing setara dengan Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols (Soil Survey Staff, 1998). Tanah-tanah Inceptisols dan Vertisols umumnya mempunyai fisiografi dataran dan berasal dari bahan induk masing-masing endapan liat dan endapan liat berkapur. Sementara itu tanah Alfisols mempunyai fisiografi bukit lipatan dan berasal dari bahan induk batu kapur (Lembaga Penelitian Tanah, 1966).

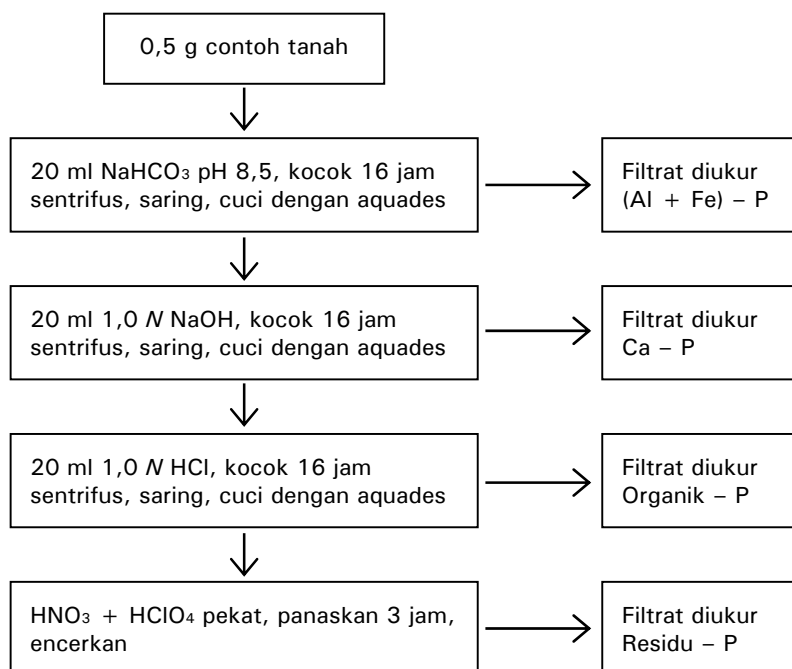
Contoh tanah dari lapangan dikeringudarkan, ditumbuk, diayak dengan menggunakan saringan 2 mm lalu dimasukkan ke dalam kantong plastik berlabel. Analisis karakteristik tanah dilakukan terhadap sifat-sifat tanah yang diduga berkaitan erat dengan ketersediaan P tanah. Sifat-sifat tanah tersebut meliputi: pH H₂O (1:5), kadar liat (pipet), C-organik (kjeldahl), Ca dan Mg_{dd} (NH₄OAc pH 7.0), dan Al_{dd} tanah (KCl 1 N). Kadar P di dalam tanah diduga dengan menggunakan pengestrak HCl 25%, Olsen, dan Bray I. Penetapan fraksionasi P mengikuti prosedur Kuo (1996) sedangkan jerapan P menurut prosedur Fox dan Kamprath (1970). Selanjutnya pengukuran pH menggunakan pHmeter, kadar liat dengan gravimetri, C dan P dengan *spectrophotometer*, serta Ca dan Mg dengan *atomic absorption spectrometer* (AAS).

Contoh tanah yang digunakan untuk analisis fraksionasi dan jerapan P tanah adalah masing-masing satu contoh tanah komposit yang diambil dari sekitar profil yang mewakili Inceptisols, Alfisols, dan Vertisols. Tanah-tanah yang diteliti mempunyai tekstur liat, reaksi tanah netral (Inceptisols dan Vertisols) hingga alkalin (Alfisols), sedangkan

kemasaman tanah (Al_{dd}) semuanya rendah, dan kejenuhan basa (KB) semuanya tinggi. Hasil analisis semi kualitatif mineral fraksi liat menunjukkan bahwa tanah Vertisols didominasi oleh mineral liat smektit sedangkan tanah Alfisols dan Inceptisols didominasi oleh smektit dan kaolinit. Karakteristik tanah lebih rinci (termasuk sifat-sifat tanah dari profil perwakilan) telah dilaporkan oleh Nursyamsi *et al.* (2007).

Penetapan fraksionasi P tanah

Fraksi P tanah yang ditetapkan meliputi: P cepat, sedang, dan lambat tersedia. Bentuk P cepat tersedia meliputi bentuk (Fe + Al)-P dan Ca-P yang masing-masing diduga dengan pengestrak NaHCO₃ pH 8.5 dan NaOH 1 N; P sedang tersedia meliputi bentuk organik-P yang diduga dengan pengestrak HCl 1 N; sedangkan P lambat tersedia meliputi bentuk residu-P yang diduga dengan pengestrak HNO₃ + HClO₄ pekat. Contoh tanah diekstraksi secara berurutan seperti yang disajikan pada Gambar 1. Selanjutnya konsentrasi P dalam filtrat ditetapkan dengan prosedur *molybdate-ascorbic* dan menggunakan *spectrophotometer*.



Gambar 1. Prosedur fraksionasi P tanah

Figure 1. Procedure for soil P fractionation

Penetapan jerapan P tanah

Penetapan jerapan P dilakukan dengan pendekatan model Langmuir (Fox and Kamprath, 1970; Syers *et al.*, 1973). Contoh masing-masing tanah ditimbang 2 g dan dimasukkan ke dalam botol kocok, lalu ditambahkan 20 ml larutan CaCl_2 0.001 M yang mengandung 10 tingkat konsentrasi P. Konsentrasi P yang digunakan adalah : 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75, dan 100 ppm P dari KH_2PO_4 . Ekstraksi tanah diinkubasi selama enam hari dan dikocok dua kali sehari, masing-masing selama 30 menit pagi dan sore hari. Setelah inkubasi larutan disaring dan ekstrak jernih digunakan untuk pengukuran P. Selanjutnya konsentrasi P dalam ekstrak ditetapkan dengan persedur *molybdate-ascorbic* dan menggunakan *spectrophotometer*.

Jerapan P dihitung dengan model Langmuir menurut Fox dan Kamprath (1970) yang menggunakan persamaan sebagai berikut: $x/m = kbC / (1 + kC)$. Dimana: x/m = jumlah P yang dijerap per satuan bobot tanah; k = konstanta yang berkaitan dengan energi ikatan; b = daya jerap P maksimum; dan C = konsentrasi C dalam keseimbangan. Persamaan tersebut diubah menjadi : $C/x/m = 1/kb + 1/b C$. Pengeplotan antara $C/x/m$ dengan C akan menghasilkan garis lurus dengan persamaan regresi $Y = p + qX$. Nilai q persamaan regresi tersebut sama dengan $1/b$ persamaan di atas, sehingga nilai b dapat ditentukan. Setelah nilai b diketahui maka nilai k dapat dihitung. Nilai b merupakan jerapan maksimum dan k merupakan nilai konstanta energi ikatan suatu tanah.

Uji korelasi

Peubah ketersediaan P (P-HCl, P-Olsen, P-Bray I, jerapan maksimum, dan konstanta energi ikatan) dikorelasikan dengan sifat-sifat tanah. Sifat-sifat tanah yang memiliki koefisien korelasi (r) nyata pada taraf uji 5% dinyatakan sebagai faktor tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kadar P tanah

Ketersediaan dan mobilitas P pada tanah-tanah yang berasal dari bahan kapur (alkalin) dapat diduga dengan pengeksrak Olsen (0,5 M NaHCO_3) dan air atau 0.01 M CaCl_2 (Robbin *et al.*, 1999). Penelitian ini (tanah-tanah netral dan alkalin) menggunakan pengeksrak Bray I, Olsen, dan HCl 25%. Apabila kadar P tanah terekstrak ketiga pengeksrak tersebut dianggap sebagai indikator ketersediaan P tanah, maka P tersedia di dalam tanah berdasarkan ketiga pengeksrak tersebut menunjukkan tren yang sama, yakni dari tinggi ke rendah adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols (Tabel 1). Faktor-faktor yang dapat berpengaruh terhadap kadar P tanah antara lain adalah: (1) bahan induk, (2) tingkat perkembangan, dan (3) pengelolaan tanah. Di antara ketiga faktor tersebut yang paling dominan adalah faktor pengelolaan tanah. Berdasarkan pengamatan di lapangan, tanah-tanah Inceptisols dan Vertisols umumnya merupakan lahan sawah atau lahan kering intensifikasi. Sementara itu, tanah-tanah Alfisols umumnya merupakan lahan kering yang dikelola tidak

Tabel 1. Kisaran kadar P tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols berdasarkan pengeksrak Bray I, Olsen, and HCl 25%

Table 1. Soil P content rate of Inceptisols, Vertisols, and Alfisols extracted with Bray I, Olsen, and HCl 25% methods

Pengeksrak	Unit	Inceptisols	Vertisols	Alfisols
Bray I	mg kg ⁻¹	39 ± 22	27 ± 19	13 ± 11
Olsen	mg kg ⁻¹	57 ± 46	39 ± 27	11 ± 11
HCl 25%	mg kg ⁻¹	616 ± 303	516 ± 385	183 ± 176
Jumlah contoh		13	47	31

intensif, seperti: palawija, sawah tadah hujan, kebun singkong, dan lain-lain. Penggunaan pupuk (terutama pupuk P) pada lahan sawah intensifikasi umumnya tinggi, baik takaran maupun intensitasnya. Unsur P bersifat *immobile* dalam tanah (Havlin *et al.*, 1999) sehingga residunya terakumulasi dan akhirnya menyebabkan kadarnya dalam tanah menjadi tinggi.

Di antara tiga metode ekstraksi yang digunakan, kadar P tanah-tanah yang dicoba dari tinggi ke rendah adalah HCl 25% > Olsen > Bray I. Jumlah P yang dapat terekstrak tergantung jenis dan konsentrasi pengeksrak serta lama pengocokan ekstrak tersebut. Ketiga metode ekstraksi tersebut berturut-turut menggunakan HCl 25% dan pengocokan 300 menit (Sulaeman *et al.*, 2005); 0,5 M NaHCO₃ dan pengocokan 30 menit; serta 0,03 N NH₄F dalam 0,0025 N HCl dan pengocokan lima menit (Kuo, 1996). Akibatnya pengeksrak HCl 25% dapat melarutkan hampir semua bentuk P tanah baik yang cepat, sedang, maupun yang lambat tersedia. Sementara itu, pengeksrak Olsen dan Bray I hanya dapat melarutkan bentuk P cepat dan sedang tersedia. Biasanya P terekstrak HCl 25% disebut sebagai P potensial sedangkan P terekstrak Olsen dan Bray I sebagai P aktual.

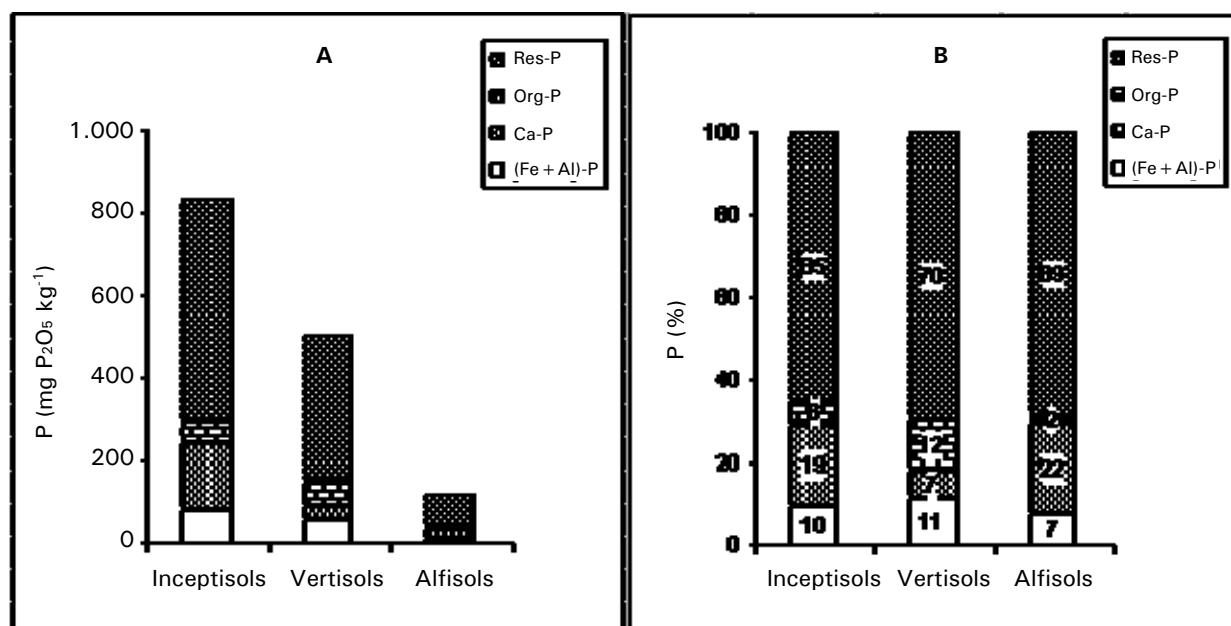
Fraksionasi P tanah

Kadar dan proporsi bentuk-bentuk P pada tiga jenis tanah yang diteliti masing-masing disajikan pada Gambar 2A dan 2B. Sejalan dengan P terekstrak Bray I, Olsen, dan HCl 25%, urutan kadar P total tanah-tanah yang diteliti adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols, yakni berturut-turut 835, 506, dan 119 mg P₂O₅ kg⁻¹. Namun demikian kadar P total tanah tidak selalu menggambarkan tingkat ketersediaan P tanah karena ketersediaan P tanah selain tergantung kadar P total tanah juga tergantung kadar aktual dan daya sangga P tanah. Kedua peubah terakhir dapat diduga dengan membuat kurva hubungan faktor intensitas (P larut) dan kuantitas (P terjerap) (Widjaja-Adhi dan Sudjadi, 1987).

Proporsi bentuk P dari tinggi ke rendah pada ketiga tanah yang diteliti adalah residu-P > Ca-P > (Fe+Al)-P > organik-P. Bentuk residu-P berkisar antara 65-70%, Ca-P 7-22%, (Fe+Al)-P 7-10%, dan organik-P 2-12%. Bentuk Ca-P, Fe-P, dan Al-P merupakan bentuk P yang cepat tersedia sedangkan organik-P dan residu-P sedang hingga lambat tersedia bagi tanaman. Dengan demikian sebagian besar P tanah-tanah yang diteliti berada dalam bentuk lambat tersedia. Bentuk P yang lambat tersedia merupakan P cadangan yang sangat penting dalam mempertahankan konsentrasi bentuk P cepat tersedia karena bentuk-bentuk P tersebut berada dalam reaksi keseimbangan dalam tanah (Widjaja-Adhi dan Sudjadi, 1987).

Bentuk residu-P tanah-tanah ini merupakan bentuk P yang tidak larut oleh pengeksrak NaHCO₃ pH 8.5, NaOH 1 N, dan HCl 1 N, tetapi larut setelah didestruksi oleh HNO₃ dan HClO₄ pekat. Dengan demikian bentuk P tersebut adalah P yang terjerap oleh koloid liat. Tanah-tanah yang diteliti didominasi oleh mineral liat smektit (tipe 2:1) untuk Vertisols serta smektit dan kaolinit (tipe 1:1) untuk Inceptisols dan Alfisols (Nursyamsi *et al.*, 2007). Di daerah tropika (terutama di daerah basah), kedua jenis mineral tersebut mengalami penghancuran intensif menghasilkan mineral liat oksida dan atau hidrousoksida. Retensi mineral liat terakhir terhadap P sangat tinggi (Saha *et al.*, 1998).

Pada tanah-tanah yang diteliti bentuk Ca-P > (Fe+Al)-P. Hal ini disebabkan karena tanah-tanah yang diteliti mempunyai reaksi tanah netral hingga alkalin dan kadar Ca_{dd} tanah jauh lebih besar dibandingkan Al_{dd} tanah. Kadar Ca_{dd} tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols berturut-turut berkisar antara 10,06 ± 2,09, 36,40 ± 14,26, dan 30,88 ± 11,02 Cmol_c kg⁻¹. Sementara itu kisaran Al_{dd} ketiga tanah tersebut berturut-turut 0,28 + 0,29, 0,25 + 0,30, dan 0,10 + 0,19 Cmol_c kg⁻¹ (Nursyamsi *et al.*, 2007). Hal tersebut menunjukkan bahwa pada tanah-tanah yang diteliti, jerapan P oleh Ca lebih dominan daripada oleh Al dan Fe. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Zhou dan Li (2001) yang melaporkan bahwa Ca berkontribusi



Gambar 2. Kadar (A) dan proporsi (B) bentuk-bentuk P tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols
Figure 2. Soil P forms content (A) and proportion (B) of Inceptisols, Vertisols, and Alfisols

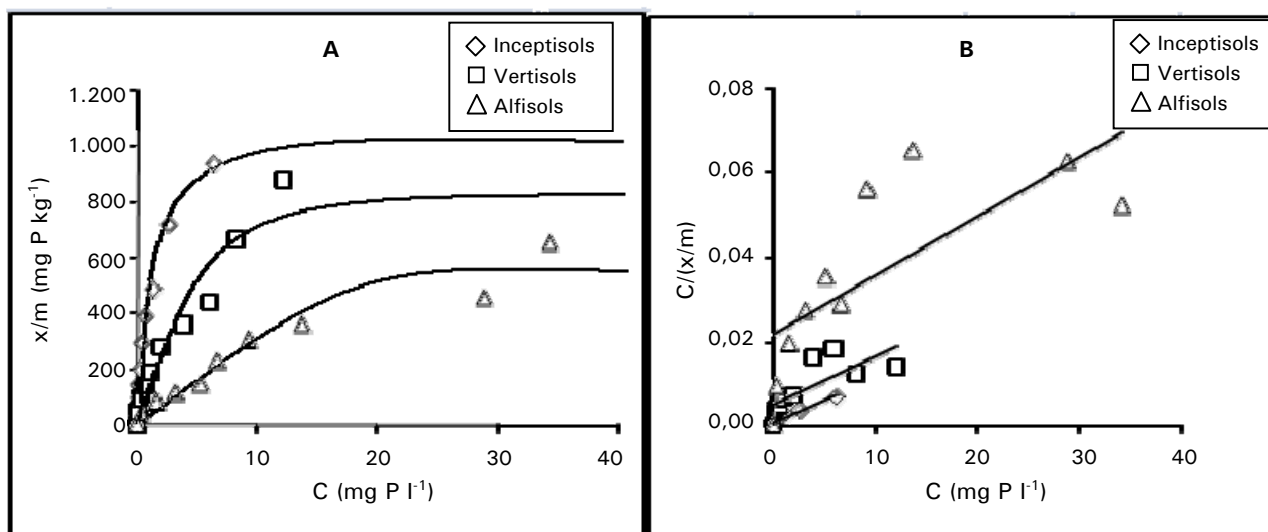
nyata terhadap jerapan P tanah-tanah yang berasal dari bahan induk batu kapur (tanah alkalin). Sementara itu pada tanah-tanah tropika masam, P lebih banyak dijerap oleh Al dan Fe daripada Ca (Sarah *et al.*, 2006). Demikian pula Al dan Fe berkontribusi nyata terhadap jerapan P pada tanah-tanah humus yang mempunyai akumulasi Al dan Fe tinggi (Giesler *et al.*, 2005).

Jerapan P tanah

Tanah-tanah yang diteliti memiliki kurva jerapan P yang sangat beragam, baik puncak maupun kemiringannya (Gambar 3A). Kurva tersebut dari kiri ke kanan menunjukkan tingkat jerapan tanah terhadap P, dimana semakin ke kanan maka jerapan P tanahnya semakin rendah. Dengan demikian maka jerapan P tanah dari tinggi ke rendah berturut-turut adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols. Hal tersebut berkaitan erat dengan sifat *inherent* dari tanah-tanah yang diteliti memang berbeda. Sifat-sifat tanah yang berpengaruh terhadap jerapan P antara lain: tekstur, pH, kation, dan lain-lain. Semua variabel tersebut berbeda antar tanah yang satu

dengan yang lainnya (Nursyamsi *et al.*, 2007) sehingga menghasilkan kurva jerapan yang berbeda pula.

Kurva jerapan P tanah merupakan indikasi kemampuan tanah dalam menyediakan hara yang bersangkutan bagi tanaman. Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah, selain faktor intensitas (I) dan kuantitas (Q), daya sangga juga berkontribusi besar terhadap penyediaan P untuk tanaman. Daya sangga (DS) adalah perubahan faktor kuantitas (P terjerap) persatuan perubahan dalam intensitas (P larut) yang biasa dinyatakan dengan rumus: $DS = \partial Q / \partial I$ (Widjaja-Adhi dan Sudjadi, 1987). Semua kurva jerapan P tanah-tanah yang diteliti berbentuk kuadratik-plato (Gambar 3A) sehingga daya sangga tanah terhadap P berubah seiring dengan berubahnya intensitas P tanah. Daya sangga dapat diduga dari kemiringan kurva, dimana kurva yang landai maka daya sangganya rendah, sebaliknya kurva yang curam memiliki daya sangga tinggi. Dengan demikian daya sangga ketiga tanah yang diteliti dari tinggi ke rendah adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols > Inceptisols. Daya sangga ini menunjukkan tingkat kemampuan tanah untuk



Gambar 3. Kurva jerapan P (A) dan hubungan antara C dengan C/(x/m) (B) pada tanah Inceptisol, Vertisol, dan Alfisol

Figure 3. Soil sorption (A) and relationship between C and C/(x/m) (B) curves of Inceptisols, Vertisols, and Alfisols

Tabel 2. Model persamaan kurva jerapan: $Y = aX^2 + bX + c$ ($0 < X < X_{mak}$) dan $Y = X_{mak}$ ($X > X_{mak}$), daya sangga tanah, dan jumlah P yang diperlukan untuk mencapai $I = 0,02 \text{ mg l}^{-1}$.

Table 2. Equation model of soil sorption curve: $Y = aX^2 + bX + c$ ($0 < X < X_{mak}$) and $Y = X_{mak}$ ($X > X_{mak}$), soil buffering capacity, and amount of P to attend $I = 0.02 \text{ mg l}^{-1}$

Tanah	$0 < X < X_{mak}$			$X > X_{mak}$	R^2	Daya sangga tanah	Jumlah P
	a	b	c	Jerapan maksimum mg kg^{-1}			
Inceptisols	-34,120	344,900	107,700	1.000	0,961	344	115
Vertisols	-1,201	81,170	63,430	833	0,979	81	65
Alfisols	-0,338	27,920	34,770	556	0,953	28	35

$Y = P$ terjerap = quantity factor = Q (mg kg^{-1}); $X = P$ larut = intensity factor = I (mg l^{-1}); a, b, dan c = konstanta, R^2 = koefisien determinan

selalu mensuplai P ke dalam larutan tanah bila konsentrasi P dalam larutan menurun akibat diserap tanaman.

Kebutuhan P eksternal untuk jagung pada *Typic Dystrandepts* adalah $0,016 \text{ mg l}^{-1}$ (Widjaja-Adhi dan Silva, 1986), sedangkan untuk padi pada tanah-tanah sawah adalah $0,02 \text{ mg l}^{-1}$ (Sri Mulyani dan Santoso, 1992). Bila nilai $0,02 \text{ mg l}^{-1}$ dianggap sebagai batas kecukupan (*sufficiency level*) P tanaman maka nilai daya sangga dan jumlah pupuk P yang diperlukan pada ketiga tanah yang diteliti dapat

dihitung dan hasilnya disajikan pada Tabel 2. Daya sangga Inceptisols (344 mg l^{-1}) lebih empat kali lipat Vertisols (81 mg l^{-1}) dan lebih 12 kali lipat Alfisols (28 mg l^{-1}). Dengan demikian kemampuan tanah Inceptisols untuk selalu mensuplai P ke dalam larutan tanah lebih baik dibandingkan Vertisols dan Alfisols. Demikian pula jumlah pupuk P yang diperlukan untuk mencapai $0,02 \text{ mg l}^{-1}$ P dalam larutan tanah, Inceptisols (115 mg kg^{-1}) hampir dua kali lipat Vertisols (65 mg kg^{-1}) dan lebih dari tiga kali lipat Alfisols (35 mg kg^{-1}). Sebagian besar P yang

Tabel 3. Variabel jerapan P tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols*Table 3. Soil P sorption variables of Inceptisols, Vertisols, and Alfisols*

Variabel jerapan P tanah	Inceptisols	Vertisols	Alfisols
Konstanta (p)	0,0006	0,004	0,0181
Koefisien arah (q)	0,0010	0,0012	0,0018
Koefisien determinan (R ²)	0,958	0,698	0,626
Jerapan maksimum (b)	1.000	833	556
Konstanta energi ikatan (k)	1,667	0,300	0,099

$Y = p + qX$ setara dengan $C/(x/m) = 1/kb + C/b$; dimana p = konstanta, q = koefisien arah, C = P terlarut (mg l⁻¹ P), x/m = P terjerap (mg kg⁻¹ P), b = jerapan P maksimum (mg kg⁻¹ P), dan k = konstanta energi ikatan P

ditambahkan dari pupuk akan dijerap oleh tanah kemudian P terjerap tersebut akan lepas sedikit demi sedikit ke dalam larutan tanah seiring dengan P yang diserap tanaman.

Jerapan maksimum dan konstanta energi ikatan ketiga tanah yang diteliti telah dihitung dan hasilnya disajikan pada Tabel 3. Tabel tersebut menunjukkan bahwa jerapan maksimum tanah Inceptisols (1.000 mg kg⁻¹) lebih besar dari Vertisols (833 mg kg⁻¹) bahkan hampir dua kali lipat Alfisols (556 mg kg⁻¹). Nilai tersebut masih jauh lebih tinggi dibandingkan dengan jerapan P tanah Alfisols Savanna di Nigeria yang hanya berkisar antara 103-460 mg kg⁻¹ P (Agbenin, 2003). Sementara itu, konstanta energi ikatan Inceptisols (1,667) lebih lima kali lipat Vertisols (0,300) dan lebih dari 18 kali lipat Alfisols (0,099). Peubah jerapan maksimum menunjukkan tingkat kemampuan tanah menyimpan hara dalam koloid tanah, sedangkan konstanta energi ikatan menunjukkan tingkat kekuatan koloid tanah menjerap hara yang berbanding terbalik dengan tingkat kemudahan hara untuk lepas ke dalam larutan tanah.

Korelasi antara sifat-sifat tanah dengan peubah ketersediaan P tanah

Ketersediaan P tanah diduga dengan peubah jerapan maksimum (b), konstanta energi ikatan (k), dan kadar P-HCl, Olsen, dan Bray I. Pada Inceptisols, kadar liat berkorelasi positif nyata (P >

0,95) hingga sangat nyata (P > 0,99) dengan jerapan maksimum, kadar P-HCl, Olsen, dan Bray I. Demikian pula kadar C-organik tanah berkorelasi positif sangat nyata dengan kadar P terekstrak HCl dan Olsen. Selain itu, kadar Mg_{dd} tanah juga berkorelasi positif nyata dengan kadar P-HCl tanah (Tabel 4). Dengan demikian faktor tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah Inceptisols adalah kadar liat, C-organik, dan Mg_{dd} tanah.

Berbeda dengan Inceptisols, pada Vertisols hanya kadar liat dan C-organik yang berkontribusi terhadap ketersediaan P tanah. Kadar liat berkorelasi negatif nyata dengan konstanta energi ikatan, sedangkan C-organik tanah berkorelasi positif nyata dengan P-HCl tanah. Sementara itu sifat-sifat tanah lainnya tidak berkorelasi nyata dengan semua peubah ketersediaan P tanah (Tabel 5).

Seperti halnya pada Inceptisols dan Vertisols, pada Alfisols kadar liat juga berkontribusi terhadap ketersediaan P tanah. Selain itu pH dan Ca_{dd} juga berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah. Reaksi tanah berkorelasi negatif nyata dengan P-Bray I, kadar liat berkorelasi positif nyata dengan P-HCl, sedangkan Ca_{dd} berkorelasi negatif nyata dengan P-Olsen dan Bray I (Tabel 6). Dengan demikian sifat-sifat tanah yang berpengaruh terhadap ketersediaan P tanah Alfisols adalah pH, kadar liat, dan Ca_{dd} tanah.

Tabel 4. Matrik korelasi antara beberapa sifat tanah dengan beberapa peubah ketersediaan P tanah Inceptisols*Table 4. Correlation matrix between soil characteristics and variables of soil P availability at Inceptisols*

Peubah	pH	Liat	C-org	Ca _{dd}	Mg _{dd}	Al _{dd}	b	k	P-HCl	P-Olsen	P-Bray I
pH	1,000	0,191	0,333	0,437	0,331	-0,518	0,028	-0,297	0,155	0,179	0,128
Liat		1,000	0,900**	0,307	0,644*	-0,421	0,596*	-0,209	0,861**	0,757**	0,662*
C-org			1,000	0,554*	0,705**	-0,447	0,050	-0,274	0,725**	0,714**	0,389
Ca _{dd}				1,000	0,768**	-0,582*	-0,008	-0,041	0,418	0,151	-0,110
Mg _{dd}					1,000	-0,505	0,236	-0,243	0,650*	0,441	0,215
Al _{dd}						1,000	-0,164	-0,203	-0,445	-0,365	-0,260
b							1,000	0,089	0,419	0,582*	0,389
k								1,000	-0,097	-0,098	0,000
P-HCl									1,000	0,604*	0,692**
P-Olsen										1,000	0,465
P-Bray I											1,000

N = 13, $t_{0,05} = 0,553$ dan $t_{0,01} = 0,684$ **Tabel 5. Matrik korelasi antara beberapa sifat tanah dengan beberapa peubah ketersediaan P tanah Vertisols***Table 5. Correlation matrix between soil characteristics and variables of soil P availability at Vertisols*

Peubah	pH	Liat	C-org	Ca _{dd}	Mg _{dd}	Al _{dd}	b	k	P-HCl	P-Olsen	P-Bray I
pH	1,000	-0,014	-0,147	0,560**	-0,157	-0,445**	-0,060	-0,227	-0,018	-0,047	-0,155
Liat		1,000	-0,192	0,725**	0,072	0,363*	-0,057	-0,320*	-0,056	0,028	0,138
C-org			1,000	-0,200	-0,139	-0,024	0,021	0,056	0,287*	0,216	0,191
Ca _{dd}				1,000	-0,138	-0,092	-0,060	-0,141	0,056	0,017	0,109
Mg _{dd}					1,000	0,132	0,072	0,138	0,005	0,259	0,244
Al _{dd}						1,000	-0,061	-0,029	-0,261	-0,168	-0,150
b							1,000	0,245	0,087	-0,185	-0,096
k								1,000	0,032	-0,021	-0,113
P-HCl									1,000	0,653**	0,615**
P-Olsen										1,000	0,746**
P-Bray I											1,000

N = 47, $t_{0,05} = 0,287$ dan $t_{0,01} = 0,372$ **Tabel 6. Matrik korelasi antara beberapa sifat tanah dengan beberapa peubah ketersediaan P tanah Alfisols***Table 6. Correlation matrix between soil characteristics and variables of soil P availability at Alfisols*

Peubah	pH	Liat	C-org	Ca _{dd}	Mg _{dd}	Al _{dd}	b	k	P-HCl	P-Olsen	P-Bray I
pH	1,000	-0,247	0,250	0,415*	-0,471*	-0,527**	-0,080	-0,036	0,119	-0,214	-0,350*
Liat		1,000	-0,082	0,160	0,404*	-0,005	-0,003	-0,117	0,351*	0,095	0,017
C-org			1,000	0,282	-0,296	-0,078	0,108	-0,275	0,042	0,021	-0,161
Ca _{dd}				1,000	0,188	-0,178	-0,048	-0,103	0,189	-0,432*	-0,354*
Mg _{dd}					1,000	0,139	0,112	-0,224	0,263	-0,036	0,205
Al _{dd}						1,000	0,087	-0,081	-0,225	-0,184	0,048
b							1,000	-0,003	0,001	-0,009	-0,092
k								1,000	-0,113	-0,100	-0,141
P-HCl									1,000	0,397*	0,416*
P-Olsen										1,000	0,822**
P-Bray I											1,000

N = 31, $t_{0,05} = 0,349$ dan $t_{0,01} = 0,449$

Selanjutnya matrik korelasi antara beberapa sifat tanah dengan beberapa peubah ketersediaan P tanah untuk semua tanah yang diteliti disajikan pada Tabel 7. Tabel tersebut menunjukkan bahwa tidak ada sifat-sifat tanah yang berkorelasi nyata dengan peubah ketersediaan P tanah kecuali Ca_{dd} berkorelasi negatif sangat nyata dengan P-Olsen dan Al_{dd} berkorelasi negatif nyata dengan P-HCl. Kadar liat dan C-organik tanah tidak berkorelasi nyata dengan semua peubah ketersediaan P-tanah.

Kadar liat tanah memegang peranan yang penting dalam mengendalikan ketersediaan P di tiga tanah yang diteliti. Kisaran tekstur tanah-tanah tersebut semuanya berat, yakni mulai liat berlempung (Inceptisols) hingga liat berat (Vertisols). Kisaran kadar liat Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols berturut-turut adalah 37 ± 17 , 63 ± 12 , dan $53 \pm 18\%$ (Nursyamsi *et al.*, 2007). Fenomena ini menunjukkan bahwa sebagian besar P tanah terjerap oleh koloid liat. Koloid liat yang bermuatan positif dapat menjerap P yang berbentuk $H_2PO_4^-$ baik secara langsung maupun melalui *water interface* (Tan, 1998). Selain itu koloid liat yang bermuatan negatif juga dapat menjerap P melalui mekanisme jembatan kation (*cation bridging*). Pada tanah netral dan alkalin, Ca^{2+} dan Mg^{2+} dapat berperan sebagai

jembatan kation sedangkan pada tanah masam yang berperan sebagai jembatan kation adalah Fe^{3+} dan Al^{3+} (Tan, 1998).

Selain kadar liat tanah, kadar C-organik tanah juga memegang peranan penting dalam mengendalikan ketersediaan P tanah, terutama Inceptisols dan Vertisols. Hal ini menunjukkan bahwa jerapan P oleh bahan organik cukup penting pada kedua tanah tersebut. Kadar C-organik tanah-tanah tersebut sebenarnya rendah, yaitu berkisar $1,10 \pm 0,11$ dan $1,40 \pm 0,15\%$ masing-masing untuk Inceptisols dan Vertisols (Nursyamsi *et al.*, 2007). Namun demikian proporsi bentuk organik-P di kedua tanah tersebut cukup penting, yakni 5 dan 12% berturut-turut untuk Inceptisols dan Vertisols (Gambar 2B). Adapun mekanisme jerapan P oleh koloid organik mirip dengan jerapan P oleh koloid inorganik, yaitu koloid yang bermuatan positif menjerap P langsung, sedangkan koloid yang bermuatan negatif melalui mekanisme jembatan kation (Tan, 1998).

Kation juga memegang peranan penting dalam mengendalikan ketersediaan P tanah terutama Mg pada Inceptisols dan Ca pada Alfisols. Kedua kation tersebut berperan dalam menjerap P menjadi bentuk Mg-P dan Ca-P. Mekanisme jerapan P oleh kedua kation tersebut bisa melalui jembatan kation (kation

Tabel 7. Matrik korelasi antara beberapa sifat tanah dengan beberapa peubah ketersediaan P tanah semua tanah yang diteliti

Table 7. Correlation matrix between soil characteristics and variables of soil P availability at all tested soils

Peubah	pH	Liat	C-org	Ca_{dd}	Mg_{dd}	Al_{dd}	b	k	P-HCl	P-Olsen	P-Bray I
pH	1,000	-0,027	0,194	0,502	-0,164	-0,455	-0,063	-0,084	0,077	-0,115	-0,188
Liat		1,000	0,025	0,458	0,460**	0,109	0,004	-0,135	0,192	0,112	0,114
C-org			1,000	0,218*	-0,148	-0,055	0,081	-0,146	0,132	0,104	-0,014
Ca_{dd}				1,000	0,249*	-0,124	-0,059	-0,074	0,135	-0,269**	-0,085
Mg_{dd}					1,000	0,067	0,076	-0,087	0,168	0,019	0,204
Al_{dd}						1,000	0,010	-0,049	-0,245*	-0,164	-0,059
b							1,000	0,081	0,067	0,035	-0,031
k								1,000	-0,047	-0,060	-0,120
P-HCl									1,000	0,461**	0,513**
P-Olsen										1,000	0,623**
P-Bray I											1,000

N = 91, $t_{0,05} = 0,205$ dan $t_{0,01} = 0,267$

dapat dipertukarkan bereaksi dengan H_2PO_4^-) atau bisa pula kation bebas bereaksi dengan H_2PO_4^- membentuk senyawa apatit dan mengendap (Tan, 1998). Pada tanah Alfisols bentuk Ca-P tidak larut dalam pengestrak Olsen dan Bray I, yang ditandai oleh hubungan antara Ca_{dd} dengan P-Olsen dan Bray I berkorelasi negatif. Sementara itu pH berkaitan secara tidak langsung dengan ketersediaan P, yaitu pada tanah masam Al^{3+} dan Fe^{3+} sebagai agen penjerap (Sarah *et al.*, 2006), sedangkan pada tanah alkalin, sebagai agen penjerap adalah Ca (Zhou and Li, 2001) dan Mg (Tan, 1998).

KESIMPULAN

1. Ketersediaan P tanah-tanah netral dan alkalin di P. Jawa berdasarkan pengestrak HCl 25%, Olsen, dan Bray I dari tinggi ke rendah berturut-turut adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols.
2. Proporsi bentuk P dari tinggi ke rendah pada ketiga tanah yang diteliti adalah residu-P > Ca-P > (Fe + Al)-P > organik-P.
3. Daya sangga, jerapan maksimum, dan konstanta energi ikatan P di tiga jenis tanah tersebut dari tinggi ke rendah adalah Inceptisols > Vertisols > Alfisols.
4. Sifat-sifat tanah yang berpengaruh nyata terhadap peubah ketersediaan P adalah kadar liat, C-organik, dan Mg_{dd} tanah pada Inceptisols; kadar liat dan C-organik tanah pada Vertisols; dan pH, kadar liat, dan Ca_{dd} tanah pada Alfisols.

DAFTAR PUSTAKA

- Agbenin, J.O. 2003.** Extractable iron and aluminum effects on phosphate sorption in a Savanna Alfisol. *SSSAJ* 67:589-595.
- Brady, N.C. 1984.** The Nature and Properties of Soils. 9th Edition. Macmillan Publishing Company, New York.
- Dobermann, A., T. George, and N. Thevs. 2002.** Phosphorous fertilizer effects on soil phosphorous pools in acid upland soils. *SSSAJ* 66: 652-660.
- Fox, R.L and E.J. Kamprath. 1970.** Phosphate sorption isotherm for evaluating the phosphate requirement of soils. *Soil Science Society of America Proceeding* 34:902-907.
- Giesler, R., T. Andersson, L. Lovgren, and P. Persson. 2005.** Phosphate sorption in aluminum-and iron rich-humus soils. *SSSAJ* 69:77-86.
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale, and W.L. Nelson. 1999.** Soil Fertility and Fertilizers. An Introduction to Nutrient Management. Sixth Edition. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- Kuo, S. 1996.** Phosphorus. Pp 869-919 *In* Methods of Soil Analysis. Part 3 Chemical Methods. Soil Science Society of America, Inc. American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Lembaga Penelitian Tanah. 1966.** Peta Tanah Tinjau Propinsi Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur, Skala 1:250.000. Lembaga Penelitian Tanah, Bogor.
- Lombi, E., M.J. McLaughlin, C. Johnston, R.D. Armstrong, and R.E. Holoway. 2004.** Mobility, solubility, and lability of fluid and granular forms of P fertiliser in calcareous and non-calcareous soils under laboratory conditions. *Plant and Soil* 269:25-34.
- Marschner, H. 1997.** Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edition. Academic Press, Harcourt Brace & Company, Publisher. Tokyo.
- Nursamsia, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan. 2007.** Sifat-sifat tanah dominan yang berpengaruh terhadap K tersedia pada tanah-tanah yang didominasi smektit. *Jurnal Tanah dan Iklim* 26:13-28.
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 2000.** Atlas Sumberdaya Tanah Eksplorasi Indonesia, Skala 1:1.000.000. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Bogor.
- Robbin, C.W., D.T. Westermann, and L.L. Freeborn. 1999.** Phosphorous forms and extractability from three sources in a recently exposed calcareous subsoil. *SSSAJ* 63:1717-1724.
- Saha, U.K., S. Hiradate, and K. Inoue. 1998.** Retention of phosphate by hydroxyaluminosilicate and hydroxyaluminum-montmorillonite complexes. *SSSAJ* 62:922-929.

- Saleque, M.A., U.A. Nasher, A. Islam, A.B.M.B.U. Pathan, A.T.M.S. Hossain, and C.A. Meisner. 2004.** Inorganic and organic phosphorous fertilizer effects on the phosphorous fractionation in wetland rice soils. *SSSAJ* 68:1635-1644.
- Sarah, E., Johnson, and R.H. Loeppert. 2006.** Role of organic acids in phosphate mobilization from iron oxide. *SSSAJ* 70:222-234.
- Setyorini, D., D. Nursyamsi, dan M.T. Sutriadi. 2005.** Pengelolaan Hara P dan K pada Berbagai Kelas Status Hara Tanah. Laporan Hasil Penelitian, Satker Balai Penelitian Tanah, Pusat Penelitian dan Pengembangan Tanah dan Agroklimat, Bogor (tidak dipublikasikan).
- Soil Survey Staff. 1998.** Kunci Taksonomi Tanah. Edisi kedua Bahasa Indonesia. 1999. Puslittanak, Badan Litbang Pertanian. Hlm. 75-84.
- Sri Mulyani, N. dan D. Santoso. 1992.** Erapan fosfat tanah-tanah Sumatera dan Jawa dengan berbagai konsentrasi larutan CaCl₂ sebagai media ekuilibrasi. Hlm 223-242 *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah, Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah, Bogor 22-24 Agustus 1989. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Subagyo, H., N. Suharta, dan A.B. Siswanto. 2000.** Tanah-tanah pertanian di Indonesia. Hlm. 21-66 *Dalam* Sumber Daya Lahan Indonesia dan Pengelolaannya. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Sulaeman, Suparto, dan Eviati. 2005.** Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk. Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Departemen Pertanian.
- Syers, I.K., M.G. Brownman, G.W. Smillie, and R.G. Corey. 1973.** Phosphate sorption by soils evaluated by the Langmuir Adsorption Equation. *SSSA Proc.* 37:358-363.
- Tan, K.H. 1998.** Principles of Soil Chemistry. Third Edition Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Than, A.A. and K. Egashira. 2008.** Evaluation of phosphorous status of some upland soils in Myanmar. *J. Fac. Agr., Kyushu Univ.* 53(1): 193-200.
- Widjaja-Adhi, I P.G. and J.A. Silva. 1986.** Calibration of Soil Phosphorous test for maize on Typic Paleudults and Trapeptic Eustrtox. *Pemberitaan Penelitian Tanah dan Pupuk.* 6: 32-39.
- Widjaja-Adhi, I P.G. dan M. Sudjadi. 1987.** Status dan kelakuan fosfat tanah-tanah di Indonesia. Hlm 223-242 *Dalam* Prosiding Lokakarya Nasional Penggunaan Pupuk Fosfat. Cipanas, 29 Juni-2 Juli 1987. Pusat Penelitian Tanah, Bogor.
- Zhou M. and Y. Li. 2001.** Phosphorus-sorption characteristics of calcareous soils and limestone from the southern everglades and adjacent farmlands. *SSSAJ* 65:1404-1412.