

PERANAN KOLOID Al DAN Fe AKTIF DALAM PROSES RETENSI FOSFAT PADA ANDISOLS DARI SUMATERA BARAT

Dian Fiantis

*Laboratorium Genesis dan Klasifikasi Tanah
Jurusan Tanah Fakultas Pertanian Universitas Andalas Padang*

Abstract

The presence of active Al and Fe compounds in large amount in Andisols has caused strong P-retention on these mineral structure or it is bound on OH functional group or positively charged H. The objective of this research was to provide fundamental information to manage and conserve Andisols as used to be vegetable production centre in West Sumatra. The results showed that volcanic soil from Pasaman Mountain had higher retention capacity than that of Marapi Mountain. Therefore, it was needed more P for optimum plant growth. The most dominant soil properties affected pattern and amount of P retention was due to type of clay mineral found in volcanic soils. The dominant clay mineral on Andisols in West Sumatra was alofan and ferrihydrite (non-crystalline clay mineral) which are active component of Al and Fe colloids.

Key Words: Volcanic ash soil, P retention, Alofan

PENDAHULUAN

Tanah berbahan induk vulkanis tersebar cukup luas di Sumatera Barat dan biasanya menjadi daerah sentra produksi pertanian. Kontribusi dari sektor pertanian untuk pertumbuhan ekonomi daerah ini mencapai 22% dan lebih dari 70% penduduk di wilayah ini bekerja di sektor pertanian. Jika memenuhi persyaratan sifat atau penciri tanah andik (andic soil properties), maka tanah vulkanis dapat diklasifikasikan ke dalam ordo Andisol (Soil Survey Staff, 1999) atau Andosol (FAO-ISRIC-ISSS, 1998).

Kreteria penciri tanah andik adalah tanah yang mempunyai kerapatan isi (Bulk Density) yang kecil atau sama dengan 0.90 Mg M^{-3} , $\text{Al}_0 + \frac{1}{2} \text{Fe}_0$ (Al dan Fe yang diekstrak dengan asam oksalat) besar atau sama dengan 2% dan retensi P haruslah lebih besar dari 85%. Dengan demikian Andisol merupakan tanah yang mempunyai sifat tersendiri yang tak dijumpai pada tanah ordo lainnya.

Sifat dan ciri morfologi kimia, dan fisika Andisol ini berkaitan erat dengan perilaku dan asal dari Al dan / atau Fe aktif yang terdiri dari mineral liat nonkristalin parakristalin 'imogolit' (Wada, 1989), seperti alofan dan ferrihidrit serta mineral liat. Kehadiran senyawa aktif Al dan Fe

yang cukup banyak dalam tanah menyebabkan P terjerap kuat pada struktur mineral ini atau terikat pada gugus fungsional OH atau H yang bermuatan positif (Shoji et al., 1993).

Alofan merupakan mineral liat tanah yang paling reaktif karena mempunyai daerah permukaan khas yang sangat luas dan banyaknya terdapat gugus fungsional yang aktif (Farmer et al., 1991). Kehadiran alofan memberikan sifat-sifat yang khas pada tanah. Hal ini disebabkan alofan mempunyai muatan bervariasi yang besar, bersifat amfoter, KTK antara 20 sampai 50 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$ sedangkan KTA antara 5 sampai 30 $\text{cmol}(+)/\text{kg}$, struktur yang acak dan terbuka serta dapat mengikat fosfat dalam jumlah yang banyak (Wada, 1989; Tan, 1992; Van Ranst, 1995). Akibat kuatnya fiksasi fosfat oleh mineral ini, maka ketersediaan fosfat yang mudah larut akan segera berkurang dan menurut Egawa (1977) hanya 10 % dari pupuk P yang diberikan dapat digunakan oleh tanaman. Tingginya persentase kehilangan pupuk P merupakan masalah serius yang banyak dijumpai pada tanah vulkanis.

Retensi P pada Andisol di Jepang dan Selandia Baru dilaporkan dapat mencapai 6000 mg kg^{-1} tanah dan kebutuhan P untuk tanaman tentu saja akan melebihi angka ini.

Hal yang serupa besar kemungkinan akan dijumpai pula pada Andisols di Sumatera Barat. Penelitian ini merupakan penelitian yang fundamental dan amat dibutuhkan sebelum melakukan penelitian terapan ataupun dalam penentuan strategi manajemen yang rasional untuk pengelolaan tanah vulkanis. Tersedianya informasi dan data yang tepat serta akurat akan sangat membantu peningkatan produktivitas dan konservasi tanah-tanah ini.

METODA PENELITIAN

A. Bahan dan Alat

Sebelum turun ke lapangan dilakukan studi kepustakaan tentang daerah yang akan diteliti. Informasi dari peta geologi, topografi serta peta tanah masing-masing dengan skala 1:250.000 akan digunakan untuk menentukan lokasi yang tepat dan dapat mewakili tanah yang akan diteliti.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah tanah dari G. Marapi dan G. Pasaman yang mempunyai bahan induk tanah berasal dari batuan Andesit yang berumur kuartar untuk G. Marapi dan kuartar-tercier untuk tanah G. Pasaman. Contoh tanah diambil dari tanah pada toposequen sebelah Selatan G. Marapi yang terdiri dari 3 profil tanah dan 2 profil tanah pada toposequen sebelah utara G. Marapi serta pada toposequen G. Pasaman yang diwakili pula oleh 4 profil tanah. Sampel diambil dari tiap horizon tanah dan berjumlah 31 buah. Penetapan lokasi profil tanah berdasarkan peta geologi, peta tanah dan peta topografi skala 1/40.000. Contoh tanah telah dihaluskan dengan kehalusan < 2 mm dan dalam keadaan kering udara.

Untuk survei dan pengambilan contoh digunakan alat-alat standar ke lapangan seperti bor, cangkul, parang, meteran, GPS (Geographical Positioning Satellite), Munsell Soil Color Chart, kantong plastik, ring sampel dan lain-lainnya yang dianggap perlu. Alat yang digunakan di labor adalah sesuai dengan analisis yang akan dilakukan.

B. Analisis Tanah

Penentuan koloid Al dan Fe aktif dilakukan dengan analisis selective dissolution yaitu: (1) ekstraksi dengan DCB (Jackson, 1965); (2) Ekstraksi dengan

Ammonium Oksalat (Blakemore et al., 1987) dan (3) Ekstraksi Asam Pirophosphat (Blakemore et al., 1987).

Penentuan karakterisasi Retensi P dilakukan dengan analisis P Sorption Isotherm (Fox dan Kamprath, 1970) yaitu dengan cara penjujukan tanah dengan berbagai macam konsentrasi P (0, 25, 50, 100, 250 dan 500 mg P kg⁻¹) selama 6 hari. Tanah dan larutan P (1:50) dikocok 2 x 60 menit setiap hari dan pada hari keenam disentrifus dan disaring. P yang dijumpai pada supernatan dari larutan tanah kemudian dideteksi secara kolorimetri (P dalam larutan tanah). Sedangkan P yang tak terdeteksi merupakan P yang dijerap oleh tanah. Dengan demikian Retensi P adalah selisih konsentrasi larutan P yang diberikan dengan P yang terekstrak. Data yang didapat dalam analisis diatas kemudian dimasukkan ke dalam persamaan Langmuir dan Freundlich. Dengan menggunakan kedua formula ini, maksimum Retensi P dapat diduga begitu juga dengan P yang diperlukan oleh tanaman untuk pertumbuhannya yang optimal yaitu 0.2 mgkg⁻¹. Data P yang terjerap dan P yang terekstrak selanjutnya dihubungkan dengan komponen tanah lainnya terutama senyawa aktif Al dan Fe.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Andisols dari G. Pasaman mempunyai kemampuan menjerap P yang berbeda cukup nyata bila dibandingkan dengan tanah G. Marapi. Pada tanah G. Pasaman, P baru dapat dideteksi pada larutan tanahnya bila ditambahkan sebesar 120 μ g P ml⁻¹ sedangkan pada tanah G. Marapi sudah terdeteksi pada konsentrasi 60 μ g P ml⁻¹. Tabel 1 dan Tabel 2 menyajikan hasil analisis P sorption isotherm dengan menggunakan persamaan Langmuir dan Freundlich.

Berdasarkan rumus persamaan isotherm Langmuir maka diperoleh nilai Retensi (sorpsi) P maksimum dari tanah vulkanis G. Marapi lebih rendah bila dibandingkan dengan tanah vulkanis G. Pasaman. Kapasitas Retensi P tanah vulkanis Sumatera Barat ini ternyata hampir sama dengan kapasitas Retensi P pada tanah vulkanis lainnya seperti dari Jepang dan Selandia Baru (Kawai, 1979; Imai et al., 1981).

Faktor yang sangat mempengaruhi kapasitas suatu tanah untuk menjerap P adalah susunan mineral utama yang terdapat pada tanah itu (Shoji et al., 1993; Tan, 1998). Hubungan antara mineral dan Retensi P yang terjadi pada tanah secara kuantitatif dilaporkan oleh Juo and Fox (1977) sebagai berikut: (1) Retensi P antara 500 to 1000 mg P kg⁻¹ termasuk tinggi dan biasanya tanah didominasi oleh mineral oksida kristalin sedangkan (2) Retensi P diatas 1000 mg P kg⁻¹ tergolong sangat tinggi dan umumnya terjadi pada tanah yang kaya akan mineral liat non-kristalin.

Tanah pada horizon permukaan (surface) ternyata mempunyai kemampuan menjerap P yang lebih rendah bila dibandingkan pada tanah lapisan bawah (subsurface). Hal ini juga berkaitan dengan keberadaan mineral alofan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan alofan yang terdapat pada horizon bawah permukaan serta kadar bahan organik tanah yang lebih banyak pada horizon permukaan. Sibanda and Young (1986) melaporkan bahwa asan humat dan fulvat yang dikandung oleh bahan organik tanah dapat menurunkan Retensi P akibat terjadinya kompetisi untuk memperebutkan tempat adsorpsi pada permukaan alofan.

Jumlah P yang terjerap meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi P dalam larutan tanah. Reaktivitas Retensi meningkat dengan cepat yang diperlihatkan dari bentuk kurva yang hampir sejajar dengan sumbu ordinat (Y) hingga jumlah P terjerap mencapai maksimum yaitu pada saat kurva mendatar dan sejajar dengan sumbu X. Kurva adsorpsi pada horizon permukaan berbentuk huruf L sedangkan pada horizon bawah-permukaan kurva berbentuk huruf H. Menurut Tan (1992), kedua kurva baik berbentuk L ataupun H dicirikan oleh afinitas yang tinggi dari bahan padat tanah terhadap larutan tanah tetapi kurva tipe H mempunyai kapasitas Retensi yang lebih besar bila dibandingkan dengan kurva berbentuk L. Pada kurva H hampir seluruh P yang berada pada larutan tanah dijerap oleh partikel tanah sehingga tidak ada lagi yang tersisa didalam larutan tanahnya. Seluruh kurva mempunyai korelasi logaritma yang tinggi ($R^2 > 0.91$) yang

berarti seluruh data adsorpsi sesuai bila dianalisis dengan menggunakan persamaan / model adsorpsi Langmuir. Sebaliknya bila diuji dengan korelasi linear, nilainya lebih rendah bila dibandingkan dengan logaritma. Hal ini mengisyaratkan bahwa model adsorpsi untuk tanah vulkanis sebaiknya berbentuk logaritma dan bukan berbentuk linear.

Kurva adsorpsi P tanah G. Marapi mencapai puncaknya pada konsentrasi larutan tanah 0.9 mmol P L⁻¹ dengan jumlah P yang dijerap mencapai 800 mg kg⁻¹, sementara itu pada tanah G. Pasaman jumlah P yang terjerap lebih tinggi yaitu > 1500 mg P kg⁻¹. Dilaporkan oleh beberapa peneliti bahwa kurva adsorpsi P mencapai titik tertinggi dan mulai mendatar pada konsentrasi sebesar 200 to 600 mg P kg⁻¹ jika tanah mengandung alofan, pada 120 mg P kg⁻¹ jika terdapat mineral imogolit dan hanya pada 5 to 10 mg P kg⁻¹ untuk tanah yang didominasi oleh halloysit (Wada, 1985; Wada, 1989). Dari kurva Retensi P dapat dibuat dua garis yang saling memotong yang dan diinterpretasikan bahwa tempat (site) adsorpsi pada permukaan mineral lebih dari satu dan proses adsorpsi berlangsung tidak homogen.

Ryden et al. (1977) melaporkan bahwa terdapat tiga tipe dan tempat adsorpsi P yaitu pada daerah (region) I, II dan III yang masing-masing mempunyai reaktivitas yang berbeda berakibat terdapatnya energi pengikatan yang berlainan dan jumlah P maximum yang berbeda pula. Jadi peneliti ini menyarankan untuk memodifikasi persamaan asal Langmuir yang sederhana menjadi persamaan Langmuir dua-permukaan (two-surface equations). Persamaan Langmuir yang asli lebih tepat digunakan bila konsentrasi P pada larutan tanah rendah dan pada kisaran yang terbatas.

Sementara itu menurut Sanyal dan Datta Ryden et al. (1977) melaporkan bahwa terdapat tiga tipe dan tempat adsorpsi P yaitu pada daerah (region) I, II dan III yang masing-masing mempunyai reaktivitas yang berbeda berakibat terdapatnya energi pengikatan yang berlainan dan jumlah P maximum yang berbeda pula. Jadi, peneliti ini menyarankan untuk memodifikasi persamaan asal Langmuir yang

Tabel 1. Parameter Retensi P Isotherm dari Tanah G. Marapi

Profiles Horizons	Langmuir		P added to 0.2 mgkg ⁻¹	Freundlich	
	PSM mg kg ⁻¹	K L mol ⁻¹		PSM mg kg ⁻¹	Slope L mol ⁻¹
I M Surface	1012	8714	1676	960	0.43
	1016	14571	2696	1037	0.34
II M Surface	959	7182	1346	798	0.31
	980	11138	1993	847	0.31
III M Surface	856	810	1337	301	0.50
	933	7378	1341	609	0.31
IV M Surface	839	1932	320	439	0.36
	839	3154	519	509	0.30
V M Surface	593	14108	1534	710	0.57
	986	19250	2178	1137	0.28

Tabel 2. Parameter Retensi P Isotherm dari Tanah G. Pasaman

Profiles Horizons	Langmuir		P added to 0.2 mg kg ⁻¹	Freundlich	
	PSM mg kg ⁻¹	K L mol ⁻¹		PSM mg kg ⁻¹	Slope L mol ⁻¹
VI P Surface	1973	17444	6186	1863	0.19
	1998	15500	5131	1869	0.20
VII P Surface	1986	19500	6882	1921	0.19
	2011	15400	5635	1928	0.21
VIII P Surface	1998	17222	6194	2050	0.25
	2051	21571	7768	2497	0.31
IX P Surface	2011	6160	2383	1625	0.27
	1973	17444	6186	1932	0.22

asli lebih tepat digunakan bila konsentrasi P pada larutan tanah rendah dan pada kisaran yang terbatas. Sementara itu menurut Sanyal dan Datta (1991) dengan menggunakan persamaan dua-muka Langmuir, adsorpsi yang terjadi lebih realistis jika dibandingkan dengan persamaan satu-muka Langmuir.

Setelah dilakukan analisis regresi antara P terjerap maksimum dengan berbagai

komponen penyusun tanah, ternyata alofan menunjukkan korelasi yang tinggi dengan jumlah P yang terjerap. Terjadi peningkatan retensi P dengan bertambahnya jumlah alofan dalam tanah. Tetapi sebaliknya tidak terdapat hubungan yang signifikan antara P yang terjerap dengan bahan organik tanah. Hasil yang sama juga dilaporkan oleh Borggaard et al. (1990); bahwa ternyata bahan organik tidak mempengaruhi besarnya

retensi P. Ini dilakukan dengan cara mengoksidasi bahan organik dengan H_2O_2 dan setelah itu dilakukan analisis retensi P dengan hasil retensi P tidak berubah.

Kapasitas retensi P tanah yang diteliti dapat dikelompokkan menjadi 3 kelompok yaitu (1) retensi P maksimum $> 2000 \text{ mg P kg}^{-1}$, (2) retensi P maksimum antara 800 to 1000, dan (3) retensi P maksimum dibawah 700 mg P kg^{-1} . Tanah vulkanis G. Pasaman ternyata mempunyai retensi P yang paling besar diikuti oleh tanah vulkanis G. Marapi yang terletak pada lereng sebelah selatan dan yang paling rendah retensi P terjadi pada tanah vulkanis G. Marapi sebelah utara. Level kritis dari alofan untuk dapat menjerap P adalah pada konsentrasi 11% untuk tanah G. Pasaman yang mampu menjerap P lebih dari $2000 \text{ mg P kg}^{-1}$. Sedangkan pada tanah G. Marapi dengan kadar alofan 5% ternyata P yang terjerap sebesar 900 mg P kg^{-1} .

Nilai afinitas retensi (K) P atau energi pengikatan P yang didapatkan ternyata bervariasi antara tanah G. Marapi dan G. Pasaman. Nilai K cenderung meningkat sejalan dengan kedalaman tanah yang berarti energi untuk mengikat P lebih besar pada horizon bawah-permukaan daripada horizon permukaan tanahnya. Juga dapat disebutkan pada tanah G. Pasaman, P terikat lebih kuat bila dibandingkan dengan P yang terikat pada tanah G. Marapi., mengakibatkan P lebih sulit tersedia bagi tanaman yang tumbuh di tanah vulkanis G. Pasaman.

Jumlah kebutuhan P standar (KPS) yaitu pada konsentrasi P larutan tanah setelah reaksi setimbang 0.2 mg P kg^{-1} baru tercapai pada retensi P sekitar 1000 - 2000 mg P kg^{-1} untuk Tanah G. Marapi dan pada konsentrasi 2000 - 6000 mg P kg^{-1} . Ini berarti diperlukan tingkat pemupukan P yang tinggi sampai sangat tinggi agar tercapai suplai P yang cukup untuk tanaman. Hal yang sama juga dilaporkan terjadi pada tanah vulkanis di Jepang (547 sampai 2861 mg P kg^{-1}), Hawaii (763 sampai 1096 mg P kg^{-1}) dan di pulau Jawa lebih dari 2630 mg P kg^{-1} (Kawai, 1980; Syarif, 1990).

Secara umum persamaan Langmuir memberikan data yang lebih tepat dibandingkan dengan persamaan Freundlich.

Koefisien korelasi yang dihasilkan lebih tinggi bila dibandingkan dengan koefisien korelasi dari data yang dianalisis dengan persamaan Langmuir. Model retensi Freundlich juga menggunakan asumsi logaritma dan meningkat seiring dengan naiknya konsentrasi P dalam larutan tanah.

Tanah G. Pasaman mempunyai koefisien korelasi antara P yang terjerap dengan P pada larutan setimbang yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan hasil dari Tanah G. Marapi tetapi perbedaan ini berbeda tidak nyata. Kurva retensi P pada model Freundlich valid hanya pada konsentrasi P dari sedang hingga tinggi. Hasil yang sama juga dilaporkan Singh and Gilkes (1991) dan Sanyal and Datta (1991).

Nilai K dari persamaan Freundlich dapat digunakan untuk memprediksi retensi P maksimum ternyata lebih rendah dari pada nilai yang didapat dengan menggunakan persamaan berbeda tidak nyata. Salah satu kelemahan persamaan Freundlich adalah kita tidak dapat memprediksi jumlah P yang harus ditambahkan ke dalam tanah untuk pertumbuhan optimum tanaman Pertanian.

KESIMPULAN DAN SARAN

Tanah vulkanis G. Pasaman mempunyai kapasitas retensi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan Tanah G. Marapi mengakibatkan kebutuhan P untuk pertumbuhan tanaman yang optimum harus lebih besar. Sifat Tanah yang paling dominan terhadap pola dan jumlah retensi P adalah tipe mineral liat tanah yang dominan dijumpai pada Tanah vulkanis yaitu mineral liat non-kristalin (alofan dan ferrihidrit) yang merupakan komponen koloid Al dan Fe aktif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Lembaga Penelitian Universitas Andalas atas terlaksananya penelitian ini melalui bantuan dana dalam Proyek Penelitian Doktor Muda SPP/DPP tahun 2001 dengan kontrak No. 11/LP-UA/SPP-DPP/D/V/2001. Terima kasih juga diucapkan kepada Sdri. Nina Supriani dan

Halidarti yang telah membantu dalam analisis tanah di laboratorium Kimia Tanah Fakultas Pertanian Unand.

DAFTAR PUSTAKA

- Blakemore, L.C., P.L. Scarle, and B. K. Daly. 1987. Soil Bureau Laboratory Methods for chemical analysis of soil. New Zealand Soil Bureau. Soil Rep. 10A. DSIRO. New Zealand.
- Borggard, O. K., S. S. Jorgensen, J. P. Moberg and B. Raben-Lange. 1990. Influence of organic matter on phosphate adsorption by aluminium and iron oxides in sandy soils. *J. of Soil Sci.* 41:443-449.
- Egawa, T. 1977. Properties of Soil Derived from Volcanic Ash Soils. *In* K. H. Tan (ed.). 1984. Andosols. Van Nostrand Reinhold Comp. New York. pp. 249-302.
- FAO-ISRIC-ISSS. 1998. World Reference Base for Soil Resources. World Soil Resources Reports No. 84. FAO of UN. Rome.
- Farmer, V. C., W. J. McHardy, F. Palmieri, A. Violante, and P. Violante. 1991. Synthetic allophanes formed in calcareous environments; Nature, conditions of formation and transformations. *SSSA Journal Vol.* 55: 1162-1166.
- Fox, R. L. and E. J. Kamprath. 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the P requirements of soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Pro.* 34:902-907.
- Imai, H., K. W. T. Goulding and O. Talibudeen. 1981. Phosphate adsorption in allophanic soils. *J. of Soil Sci.* 32:555-570.
- Jackson, 1965. Free Oxides, hydroxides and amorphous aluminosilicates. *In* Black (ed.) *Methods of soil analysis Part I. Physical and Mineralogical Properties.* Amer. Soc. of Agronomy. Madison.
- Juo, A. S. R. and R. L. Fox. 1977. Phosphate sorption capacity of some benchmark soils in West Africa. *Soil Sci.* 124:370-376.
- Kawai, K. 1980. The relationship of phosphorus adsorption to amorphous aluminum for characterizing Andosols. *Soil Sci.* 129: 186-190.
- Ryden, J. C., J. R. McLaughen and J. K. Syers. 1977. Mechanisms of phosphate sorption by soils and hydrous ferric oxide gel. *J. Soil Sci.* 28:72-92.
- Sanyal S. K., and S. K. De Datta. 1991. Chemistry of phosphorus transformation in soils. *In* B. A. Stewart (ed.), *Advances in Soil Sci.* Springer-Verlag. New York.
- Singh, B. and R. J. Gilkes. 1991. Phosphorus sorption in relation to soil properties for the major soil types of South-western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 29:603-618.
- Sibanda, H. M. and S. D. Young. 1986. Competitive adsorption of human acids and phosphate on goethite, gibbsite and two tropical soils. *J. Soil Sci.* 37:197-204.
- Shoji, S., M. Nanzyo, and R. Dahlgren. 1993. *Volcanic Ash Soils.* Elsevier. Amsterdam. 288 p.
- Soil Survey Staff. 1999. *Soil Taxonomy. A Basic system of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys.* 2nd ed. USDA, NRCS. Washington. 846 p.
- Syarif, S. 1990. Some characteristics of Andisols from Western Indonesia. Ph.D. thesis, Univ. Western Australia, Soil Sci. and Plant Nutr., School of Agric. 247 pp.
- Tan, K.H. 1992. *Principle of Soil Chemistry (2nd ed.).* Marcell Dekker. New York. 352 p.
- Tan, K. H. 1998. *Andosols.* Program Studi Ilmu Tanah Program Pascasarjana

- Universitas Sumatera Utara. Medan. 75 p.
- Van Ranst, E. 1995. Clay Mineralogy. Lecture Notes. ITC for Post-Graduate Soil Scientists University of Gent. 287 p.
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andosols. Stewart B. A. (ed.) In advances in Soil Science vol 2. Springer Verlag. New York. Pp. 173-229.
- Wada, K. 1989. Allophane and Imogolite. In : J.B. Dixon and S. B. Weed. Minerals in Soil Environments. SSSA. Madison. pp. 1051-1087