

## MEKANISME PELEPASAN K TERFIKSASI MENJADI TERSEDIA BAGI PERTUMBUHAN TANAMAN PADA TANAH-TANAH YANG DIDOMINASI SMEKTIT

### *Mechanisms of Releasing Fixed Potassium as Available Nutrient for Plant Growth on Smectitic Soils*

D. Nursyamsi

*Balai Penelitian Lingkungan Pertanian, Jl. Raya Jakenan-Jaken Km 05, PO Box 05, Pati 59182*

#### ABSTRAK

Tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit mempunyai prospek yang cukup besar untuk dikembangkan menjadi lahan pertanian karena mempunyai penyebaran yang cukup luas di tanah air, yaitu lebih dari 2.12 juta ha (Vertisols sekitar 2.12 juta ditambah Inceptisols dan Alfisols yang bersubgrup vertik). Tanah ini umumnya mengandung K total tinggi tapi hanya sebagian kecil K tanah dapat segera tersedia untuk tanaman. Makalah ini membahas beberapa mekanisme pelepasan K terfiksasi menjadi tersedia bagi pertumbuhan tanaman pada tanah tersebut. Mineral liat smektit memberikan kontribusi signifikan terhadap jumlah muatan negatif tanah serta mengendalikan daya sangga dan jerapan maksimum K tanah. Lapisan atas (0-20 cm) tanah-tanah ini umumnya bertekstur liat, reaksi tanah netral hingga alkalin, K-potensial tanah sedang hingga tinggi,  $K_{dd}$  tanah rendah hingga tinggi, dan kapasitas tukar kation tanah sedang hingga tinggi. Meskipun  $K_1$  tanah tinggi tapi sebagian besar K tanah berada dalam bentuk yang tidak dapat dipertukarkan sehingga tidak segera tersedia bagi tanaman. Daya sangga dan jerapan maksimum K tanah semuanya tinggi. Salah satu aspek penting dalam pengelolaan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah. Cara ini efektif terutama untuk tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. Pemanfaatan K tanah dapat melalui mekanisme pelepasan dari pool  $K_{dd}$  ke pool  $K_{dd}$  (*release*) dan desorpsi dari pool  $K_{dd}$  ke pool  $K_1$  (*desorption*). Setelah reaksi pelepasan dan desorpsi berlangsung maka tanaman akan dengan mudah menyerap K (absorpsi) untuk kebutuhan hidupnya.

*Kata kunci : Mekanisme, pelepasan, K terfiksasi, K tersedia, tanah yang didominasi smektit.*

#### ABSTRACT

*Smectitic soils have considerable prospects to be developed into agricultural land. The distribution of these soils is quite large, i.e. more than 2.12 million ha (approximately 2:12 million of Vertisols as well as Alfisols and Inceptisols which have vertic subgroup). Smectite mineral contributed significantly to the amount of soil negative charge and controled soil buffering capacity and soil K maximum sorption. Top soil (0-20 cm) of smectitic soils are generally clay-textured, neutral to alkaline in soil reaction, moderate to high in potential K, low to high in exchangeable K, and moderate to high in cation exchange capacity. Although soil total K was high, but most of the soil K was in an unexchangeable form so that it was not immediately available to plants. While soil buffering capacity and maximum sorption on K were high. One important aspect in the management of soil K is the use of K contained in the soil. This method is quite effective, particularly for smectitic soils. The use of contained K in soil can be through the mechanism of release from unexchangeable soil K pool to exchangeable soil K pool as well as desorption from exchangeable soil K pool to soluble soil K pool. After both rection take place then, the plants will easily absorb K for their growth.*

*Keywords : Mechanism, release, fixed K, available K, smectitic soils.*

**T**anah-tanah yang mengandung mineral liat smektit mempunyai prospek yang cukup besar untuk dikembangkan menjadi lahan pertanian tanaman pangan jika dibarengi dengan pengelolaan tanaman dan tanah yang tepat. Di lingkungan dengan iklim yang memiliki bulan-bulan kering nyata, tanah ini memiliki sifat vertik (*verto* = membalik), yaitu tanah yang dapat mengembang (*swelling*) pada saat basah dan

mengkerut (*shrinking*) saat kering. Proses mengembang dan mengkerut erat kaitannya dengan kandungan mineral liat tipe 2:1 (smektit) yang tinggi di dalam tanah (Borchardt, 1989). Sejumlah kation, seperti  $K^+$ ,  $NH_4^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , dan lain-lain dapat masuk ke dalam ruang antar lapisan liat tipe 2:1 saat kadar air tinggi (tanah mengembang). Sebaliknya bila kadar air turun maka air yang terdapat di dalam ruang

antar lapisan akan keluar sehingga ruangan yang sebelumnya terisi air digantikan oleh udara, akibatnya tanah mengkerut dan terjadi retakan-retakan. Dengan demikian ciri utama untuk menduga keberadaan smektit di lapangan secara visual adalah adanya retakan-retakan tanah yang lebar di saat tanah kering atau pada musim kemarau.

Tanah yang mengandung mineral liat smektit umumnya terdapat pada order Vertisols dan order lain bersubgrup vertik. Tanah-tanah tersebut memiliki sifat vertik, yaitu diantaranya mempunyai bidang kilir atau ped berbentuk baji, kadar liat > 30% dalam fraksi tanah halus, dan terdapat rekahan terbuka dan tertutup secara periodik (Borchardt, 1989). Tanah dengan mineral liat smektit dominan tetapi berada di bawah iklim yang selalu lembab (musim kering tidak nyata) tidak selalu menunjukkan sifat vertik tersebut kecuali kadar liat. Di Indonesia, penyebaran tanah-tanah tersebut cukup luas, yaitu diperkirakan lebih dari 2.12 juta ha (Vertisols sekitar 2.12 juta ditambah sebageian Inceptisols dan Alfisols yang bersubgrup vertik) yang tersebar di wilayah Jawa (Jabar, Jateng, dan Jatim), Sulawesi (Sulsel, Sulteng, dan Gorontalo), dan Nusa Tenggara (Lombok) (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 2000). Tanah ini 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 (Subagyo *et al.*, 2000).

### MINERAL LIAT SMEKTIT

Smektit adalah mineral liat tanah yang umum dijumpai di daerah temperate, iklim dingin, dan dijumpai pula di daerah tropik. Smektit terbentuk di tempat yang berdrainase buruk atau di area dengan tingkat pencucian terbatas karena rendahnya curah hujan, adanya lapisan kedap di dalam profil tanah, atau permukaan air tanah yang tinggi. Termasuk dalam grup smektit yang banyak dijumpai dalam tanah adalah montmorilonit, beidelit, dan

nontronit (Allen dan Hajek, 1989). Di Indonesia mineral ini sangat dominan di tanah-tanah Vertisols dan Mollisols serta banyak pula dijumpai di tanah Inceptisols dan Alfisols. Sementara itu hektorit (kaya Li), saponit (Mg), saukonit (Zn) jarang dijumpai di dalam tanah.

Sifat mengembang-mengkerut dan muatan negatif yang tinggi menyebabkan mineral ini reaktif dalam lingkungan tanah. Di daerah dengan perbedaan iklim basah dan kering yang signifikan, proses mengembang dan mengkerut tanah terjadi sangat kentara. Selain dapat menyerap  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , dan kation lainnya yang diperlukan tanaman, smektit juga dapat menyerap senyawa organik, herbisida, dan pestisida (Borchardt, 1989).

Struktur smektit pertama kali dikemukakan oleh Hofmann *et al.*, (1933) dalam Borchardt (1989). Smektit mirip dengan struktur mika dan vermikulit dimana satu unit kristal smektit terdiri dari satu lempeng Al-oktahedral yang diapit oleh 2 lempeng Si-tetrahedral. Substitusi isomorfik dapat terjadi di kedua lempeng tersebut dan hal ini dapat berdampak terhadap karakteristik dan komposisi kimia sehingga dapat dijadikan dasar dalam klasifikasi mineral tersebut. Dioktahedral smektit (beidelit, montmorilonit, dan nantronit) terbentuk sebagai hasil hancuran dari mineral mika sedangkan trioktahedral smektit (hektorit, saponit, dan saukonit) muncul sebagai turunan (*inheritance*) dari bahan induk tanah (Allen dan Hajek, 1989).

Sifat mengembang dari smektit dipengaruhi oleh jerapan ion dan molekul di ruang antar lapisan smektit. Analisis dengan metode X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa puncak difraksi smektit muncul pada 1.5 nm pada perlakuan penjenuhan dengan Mg. Puncak difraksi meningkat menjadi 1.8 nm setelah perlakuan dengan Mg + gliserol. Puncak difraksi menurun hingga 1.25 nm setelah perlakuan penjenuhan dengan K dan menurun lagi hingga 1.0 nm setelah preparat dipanaskan hingga 550 °C (Borchardt, 1989). Kondisi smektit seperti yang dijelaskan di atas berpengaruh terhadap karakteristik kimia dan fisiknya yang akhirnya berpengaruh pula

terhadap karakteristik tanah. Berikut ini karakteristik kimia dan fisika smektit dibahas seperti yang diuraikan oleh Borchardt (1989).

### Karakteristik kimia

Selain tanah yang banyak mengandung bahan organik, tanah yang banyak mengandung smektit juga memiliki kapasitas tukar kation yang cukup tinggi, yaitu sekitar 110 cmol/kg atau berkisar antara 47-162 cmol/kg (Alexiades dan Jackson, 1966). Sumber muatan negatif smektit berasal dari substitusi isomorfik  $\text{Al}^{3+}$  terhadap  $\text{Si}^{4+}$  pada lempeng tetrahedral atau  $\text{Mg}^{2+}$  dan  $\text{Fe}^{2+}$  terhadap  $\text{Al}^{3+}$  atau  $\text{Fe}^{3+}$  pada lempeng oktahedral. Sisi ujung atau posisi-e (*edge*) dari struktur smektit juga dapat memberikan kontribusi muatan negatif walaupun dalam jumlah sedikit, yaitu hanya berkisar 1 – 5 cmol/kg. Muatan pada posisi-i (*interlayer*) merupakan sumber muatan permanen (*permanent charge*), sedangkan muatan dari posisi-e termasuk muatan tergantung pH, yaitu muatan negatif meningkat seiring dengan meningkatnya pH (*pH dependent charge*) (Borchardt, 1989).

Fiksasi K pada tanah-tanah yang mengandung mineral smektit termasuk tinggi (Ghousikar dan Kendre, 1987). Selain itu, fiksasi tanah ini terhadap kation lain juga tinggi, misal terhadap  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$  yang dapat membentuk formasi hidroksi interlayer. Tingkat fiksasi smektit terhadap kation tergantung valensi dan radius atom kation tersebut. Semakin tinggi valensi kation dan semakin kecil radius atom maka fiksasi smektit terhadap kation semakin tinggi. Kalium bervalensi satu tapi mempunyai radius atom yang jauh lebih kecil dibandingkan  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$  (Tan, 1998) sehingga fiksasinya oleh mineral liat smektit tinggi.

Pertukaran anion pada smektit sangat rendah, yaitu  $< 5$  cmol/kg (Bingham *et al.*, 1965). Anion yang memiliki ukuran yang sesuai dapat menggantikan ion  $\text{OH}^-$  hanya pada posisi-e di struktur mineral. Hal inilah yang menyebabkan kapasitas tukar anion (KTA) smektit sangat

rendah sehingga tidak berpengaruh nyata terhadap jerapan anion. Tanah-tanah dengan kapasitas tukar anion tinggi umumnya memiliki polimer hidroksi-Al pada permukaan mineral, seperti mineral besi atau aluminium oksida. Kedua mineral tersebut dapat memberikan kontribusi terhadap KTA yang signifikan.

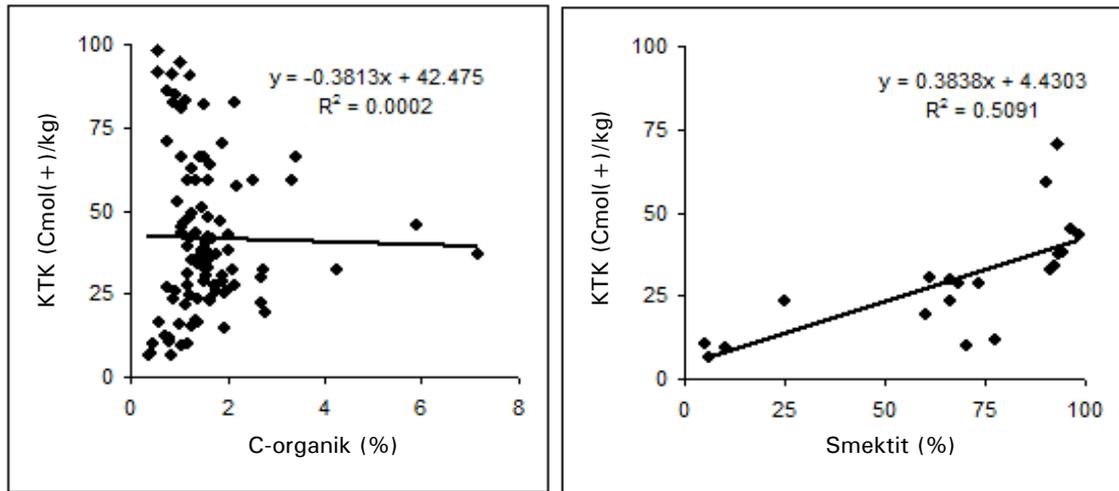
### Karakteristik fisika

Sifat mengembang dan mengkerut ini berimbang terhadap karakteristik fisika tanah lainnya, seperti: hidrasi dan dehidrasi, ekspansi pada tanah-tanah berbahan smektit, dan stabilitas tanah. Jerapan air diantara lapisan smektit berkaitan erat dengan jarak basal smektit yang dapat diukur dengan metode XRD. Hidrasi  $\text{H}_2\text{O}$  oleh kation yang dapat dipertukarkan membentuk lapisan pertama dengan energi ikatan yang tinggi. Lapisan berikutnya dijera dengan energi yang lebih rendah. Hendricks *et al.* (1940) dalam Borchardt (1989) menyatakan bahwa  $\text{H}_2\text{O}$  yang diikat pada permukaan kompleks jerapan smektit berbentuk heksagonal.

Sifat kohesi dan adhesi smektit juga berbeda dengan mineral tanah lainnya. Sifat ini berkaitan erat dengan peristiwa longsor (*landslide*), pergerakan tanah (*soil creep*), dan erosi. Tanah-tanah yang mengandung smektit tinggi berpotensi untuk terjadinya longsor karena smektit dapat menyerap air dalam jumlah banyak (Borchardt, 1989). Smektit juga hampir selalu identik dengan peristiwa pergerakan tanah yang disebabkan oleh adanya ekspansi dan kontraksi akibat perubahan kadar air tanah. Selain itu erodibilitas tanah-tanah yang mengandung smektit tinggi dipengaruhi oleh kekuatan keregangan tanah. Kekuatan keregangan tanah tergantung dari kejenuhan kation dimana kekuatannya menurun menurut urutan:  $\text{Fe}^{3+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+}$ .

### Peranan smektit dalam mengendalikan ketersediaan K tanah

Mineral liat smektit yang merupakan sumber muatan permanen sangat berperan dalam mengendalikan ketersediaan K tanah.



Sumber: Nursyamsi *et al.* (2007)

**Gambar 1. Hubungan antara Kadar C-organik dan smektit dengan KTK Tanah**

Hubungan antara kadar smektit dengan KTK yang positif nyata ( $R^2 = 0,5091$ ) menunjukkan bahwa smektit berkontribusi signifikan terhadap jumlah muatan negatif tanah. Sebaliknya hubungan antara kadar C-organik dengan KTK tanah yang tidak nyata ( $R^2 = 0,0002$ ) menunjukkan bahwa bahan organik tidak memberikan kontribusi yang signifikan terhadap muatan negatif tanah (Gambar 1). Fenomena ini membuktikan bahwa pada tanah-tanah yang didominasi oleh mineral liat smektit (Vertisols), sumber muatan permanen lebih penting daripada sumber muatan variabel dalam mengendalikan KTK tanah. Pada tanah yang didominasi oleh sumber muatan variabel seperti tanah Ultisols di daerah Sasamba, Kaltim (Prasetyo *et al.*, 2001) dan Ultisols dari bahan vulkan andesitik di daerah Ungaran, Jateng (Prasetyo *et al.*, 2005) bahan organik memberikan kontribusi yang signifikan terhadap muatan negatif tanah.

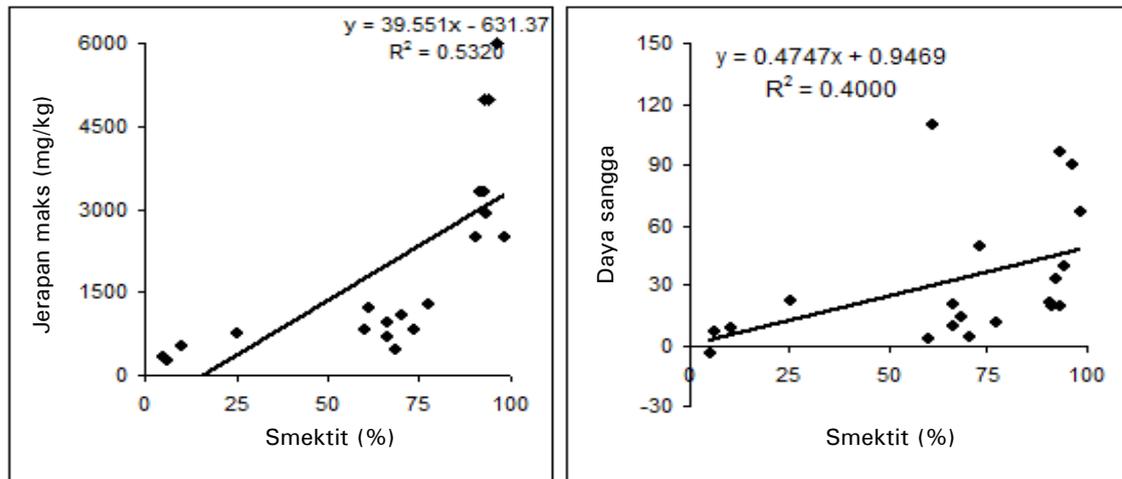
Hubungan antara kadar smektit dengan daya sangga dan jerapan maksimum K tanah positif nyata dengan nilai koefisien determinan ( $R^2$ ) masing-masing 0,4000 dan 0,5320 (Gambar 2). Hal ini menunjukkan bahwa mineral liat smektit selain berperan terhadap muatan negatif tanah juga dapat mengendalikan daya sangga dan jerapan maksimum K tanah. Dengan demikian maka smektit memegang peranan

penting dalam penyediaan K untuk tanaman pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit.

## KARAKTERISTIK TANAH-TANAH YANG DIDOMINASI MINERAL LIAT SMEKSTIT

### Karakteristik kimia tanah

Kisaran karakteristik tanah lapisan atas (0-20 cm) tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit disajikan pada Tabel 1. Menurut kriteria Pusat Penelitian Tanah (1983) semua tanah yang diteliti bertekstur liat, reaksi tanah netral (Inceptisols dan Vertisols) hingga alkalin (Alfisols), sedangkan kemasaman tanah semuanya rendah, sebaliknya kejenuhan basa (KB) semuanya tinggi. Kadar C dan N-organik tanah semuanya rendah, kadar K-potensial tanah sedang (Inceptisols dan Alfisols) hingga tinggi (Vertisols), sedangkan kadar P-potensial tanah semuanya tinggi. Kadar Ca dan  $Mg_{dd}$  tanah termasuk sedang (Inceptisols) hingga tinggi (Vertisols dan Alfisols), sedangkan  $K_{dd}$  tanah termasuk rendah (Inceptisols), sedang (Alfisols), dan tinggi (Vertisols). Kapasitas tukar kation (KTK) tanah termasuk sedang (Inceptisols) hingga tinggi (Alfisols dan Vertisols).



Sumber: Nursyamsi et al. (2007)

**Gambar 2.** Hubungan antara kadar smektit dengan jerapan maksimum dan daya sangga K tanah

**Tabel 1.** Kisaran karakteristik contoh tanah lapisan atas (0-20 cm) tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit dari Jawa

Karakteristik tanah	Metode/pengekstrak	Inceptisols	Vertisols	Alfisols
Kadar liat (%)	Pipet	37 ± 17	63 ± 12	53 ± 18
pH H <sub>2</sub> O	Air (1:2,5)	6,0 ± 0,8	6,5 ± 0,9	7,0 ± 0,9
C-organik (%)	Kjeldahl	1,10 ± 0,11	1,40 ± 0,15	2,04 ± 0,44
N-total (%)	Kjeldahl	0,09 ± 0,05	0,20 ± 0,10	0,19 ± 0,10
K-potensial (ppm K <sub>2</sub> O)	HCl 25%	148 ± 102	239 ± 140	198 ± 96
P-potensial (ppm P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	HCl 25%	516 ± 203	548 ± 274	583 ± 295
Nilai tukar kation				
C <sub>add</sub> (Cmol(+)/kg)	NH <sub>4</sub> OAc pH 7,0	10,06 ± 2,09	36,40 ± 14,26	30,88 ± 11,02
Mg <sub>dd</sub> (Cmol(+)/kg)	NH <sub>4</sub> OAc pH 7,0	2,99 ± 1,14	6,98 ± 2,34	3,57 ± 1,17
K <sub>dd</sub> (Cmol(+)/kg)	NH <sub>4</sub> OAc pH 7,0	0,13 ± 0,11	0,33 ± 0,27	0,25 ± 0,18
KTK (Cmol(+)/kg)	NH <sub>4</sub> OAc pH 7,0	16,92 ± 6,92	56,38 ± 22,17	30,83 ± 13,20
KB (%)	NaCl	85 ± 20	84 ± 29	>100 ± 79
Kemasaman				
Al <sub>dd</sub> (Cmol(+)/kg)	KCl 1N	0,28 ± 0,29	0,25 ± 0,30	0,10 ± 0,19
H <sub>dd</sub> (Cmol(+)/kg)	KCl 1 N	0,28 ± 0,07	0,29 ± 0,12	0,26 ± 0,08
Jumlah contoh		13	47	31

Sumber : Nursyamsi *et al.* (2007)

#### Karakteristik mineral liat tanah

Hasil analisis semi kualitatif mineral fraksi liat yang dilaksanakan oleh Nursyamsi *et al.* (2007) menunjukkan bahwa tanah Inceptisols mengandung mineral liat smektit dan kaolinit

sedikit sampai sedang serta kuarsa sangat sedikit hingga sedikit. Tanah Vertisols mengandung mineral liat smektit sangat banyak, kaolinit sedikit, dan kuarsa sangat sedikit. Sementara itu tanah Alfisols mengandung mineral liat smektit dan kaolinit sedang sampai

**Tabel 2. Hasil analisis mineral liat kualitatif terhadap lapisan atas tanah-tanah yang diambil dari Jawa dengan metode XRD**

Kode contoh	Tanah	Smektit	Kaolinit	Kuarsa
NA-39	Inceptisols	++	++	+
NA-10	Inceptisols	+	+	(+)
NA-1	Inceptisols	+	+	+
DE-28	Inceptisols	++	++	+
B2-1	Vertisols	++++	+	(+)
B3-1	Vertisols	++++	-	-
B2-2	Vertisols	++++	+	(+)
B3-2	Vertisols	++++	-	-
DE-34	Vertisols	++++	-	-
DE-36	Vertisols	++++	+	(+)
NA-5	Vertisols	++++	-	-
NA-6	Vertisols	++++	+	(+)
B1-1	Alfisols	+++	++	(+)
B4-1	Alfisols	++	++++	(+)
B1-2	Alfisols	+++	++	(+)
B4-2	Alfisols	++	++++	(+)
NA-3	Alfisols	+++	+++	(+)
NA-4	Alfisols	+++	+++	(+)
NA-2	Alfisols	++	++	(+)
NA-37	Alfisols	++	+++	(+)

Sumber : Nursyamsi *et al.* (2007)

Keterangan : + + + + = sangat banyak (80-100%), + + + = banyak (60-80%), + + = sedang (40-60%), + = sedikit (20-40%), (+) sangat sedikit (0-20%), - = tidak ada (0).

banyak serta mengandung kuarsa sangat sedikit (Tabel 2). Dengan demikian maka dapat dikatakan bahwa tanah Vertisols didominasi oleh mineral liat smektit sedangkan tanah Alfisols dan Inceptisols didominasi oleh smektit dan kaolinit.

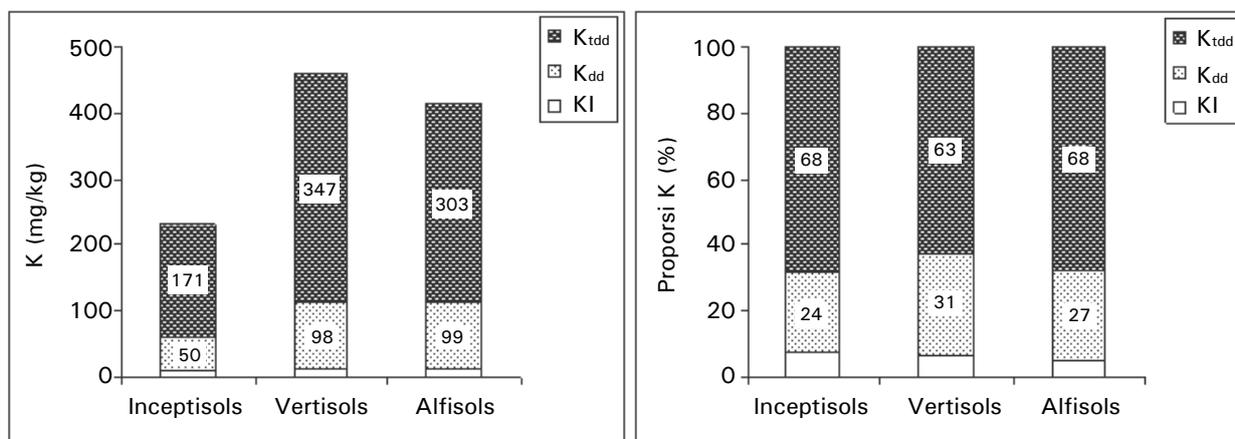
#### Fraksionasi K tanah

Nursyamsi *et al.* (2007) mengemukakan bahwa kadar K total tanah-tanah yang didominasi smektit dari tinggi ke rendah berturut-turut adalah Vertisols > Alfisols > Inceptisols. Bentuk  $K_i$ ,  $K_{dd}$ , dan  $K_{td}$  tanah dari tinggi ke rendah mempunyai urutan yang sama dengan  $K_t$  tanah. Kadar  $K_i$  adalah 14, 13, dan 11 mg/kg;  $K_{dd}$  (98, 99, dan 50 mg/kg); dan  $K_{td}$  (347, 303, dan 171 mg/kg) berturut-turut untuk Vertisols, Alfisols, dan Inceptisols, (Gambar 3). Kadar K di dalam tanah dipengaruhi oleh bahan

induk tanah tersebut, dimana Inceptisols berasal dari bahan endapan liat, Vertisols dari endapan liat berkapur, dan Alfisols dari batu kapur (Lembaga Penelitian Tanah, 1966).

Selain faktor bahan induk tanah, kadar K tanah juga sejalan dengan hasil analisis mineral liat dengan metode XRD. Berdasarkan analisis tersebut, kadar mineral liat smektit di dalam fraksi liat tanah berturut-turut dari tinggi ke rendah adalah Vertisols > Alfisols > Inceptisols (Gambar 3). Dengan kata lain kadar K tanah tergantung jumlah mineral liat smektit yang berada di dalam tanah.

Proporsi bentuk K dari rendah ke tinggi di tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit mempunyai urutan yang sama, yaitu:  $K_i < K_{dd} < K_{td}$ . Bentuk  $K_i$  berkisar antara 5-7%,  $K_{dd}$  24-31%, dan  $K_{td}$  63-68% (Gambar 3). Tampak



Sumber: Nursyamsi *et al.* (2007)

**Gambar 3. Komposisi dan proporsi bentuk-bentuk K lapisan atas tanah-tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols dari Jawa**

bahwa sebagian besar K tanah berada dalam bentuk tidak dapat dipertukarkan sehingga tidak cepat tersedia bagi tanaman. Apabila diasumsikan bentuk  $K_i$  dan  $K_{dd}$  disebut sebagai K tersedia dan  $K_{td}$  sebagai K tidak tersedia maka dapat dikatakan bahwa sebagian besar K di dalam tanah-tanah yang didominasi mineral lita smektit tidak segera tersedia bagi tanaman. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian Nursyamsi (2010) yang menunjukkan bahwa tanaman jagung respons terhadap pemupukan K pada tanah Alfisols dan Vertisols, walaupun kadar K total di kedua tanah tersebut tinggi.

#### Jerapan K tanah

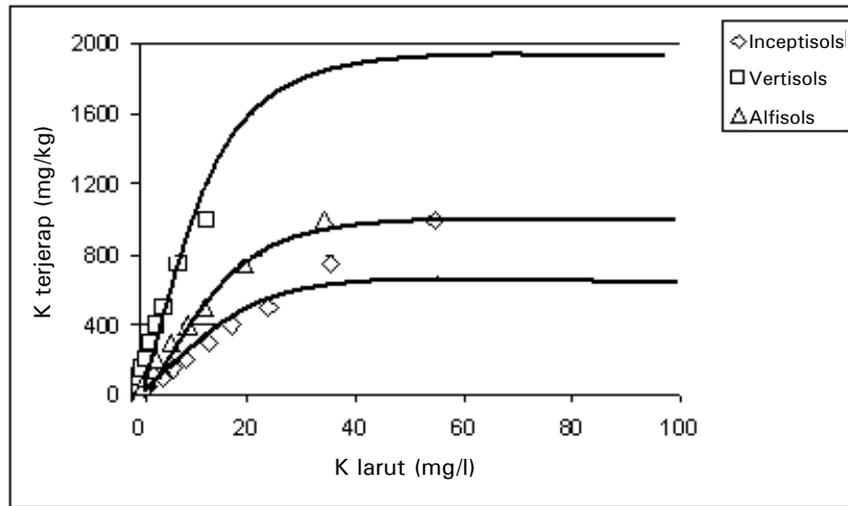
Berdasarkan kurva jerapan, maka jerapan K tanah dari tinggi ke rendah berturut-turut adalah Vertisols > Alfisols > Inceptisols. Fenomena ini erat kaitannya dengan sifat *inherent* dari ketiga tanah tersebut yang berbeda. Karakteristik tanah yang dapat berpengaruh terhadap jerapan K antara lain: tekstur, KTK, dan kadar mineral liat smektit. Semua variabel tersebut berbeda antar tanah yang satu dengan yang lainnya (Tabel 1) sehingga menghasilkan kurva jerapan yang berbeda pula (Nursyamsi *et al.*, 2009) (Gambar 4).

Selain faktor intensitas dan kuantitas, daya sangga juga dapat mempengaruhi

penyediaan K suatu tanah. Daya sangga ini menunjukkan tingkat kemampuan tanah untuk selalu mensuplai K ke dalam larutan tanah bila konsentrasi K dalam larutan menurun akibat diserap tanaman atau tercuci. Karena semua kurva jerapan K tersebut di atas berbentuk kuadratik-plato maka daya sangga tanah terhadap K berubah seiring dengan berubahnya intensitas K di dalam larutan tanah. Namun demikian daya sangga ini juga dapat diduga dari kemiringan kurva, dimana kurva yang landai daya sangganya rendah, sebaliknya kurva yang curam memiliki daya sangga tinggi. Dengan demikian maka daya sangga ketiga tanah yang diteliti dari tinggi ke rendah adalah Vertisols > Alfisols > Inceptisols (Nursyamsi *et al.*, 2009).

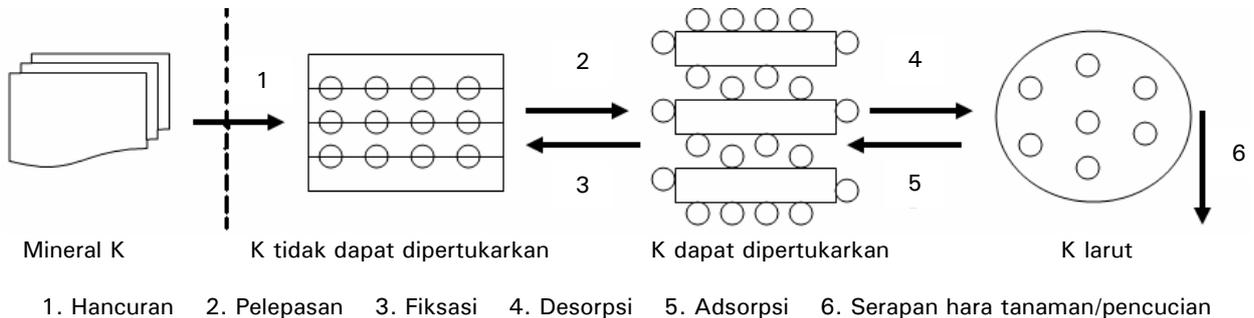
#### PEMANFAATAN KALIUM TANAH

Meskipun hanya bentuk  $K_i$  dan  $K_{dd}$  saja yang cepat tersedia bagi tanaman, namun sesungguhnya bentuk  $K_{td}$  yang meliputi K-terfiksasi dan K-struktural berpotensi untuk berubah menjadi tersedia bagi tanaman. Telah dikemukakan sebelumnya bahwa bentuk K tersedia hanya sekitar 2-10% dari total K yang terdapat di dalam tanah. Dengan demikian maka terdapat peluang yang sangat besar untuk memanen K tanah, yaitu sekitar 90-100%. Apabila peluang ini dapat dimanfaatkan maka



Sumber : Nursyamsi *et al.* (2009)

**Gambar 4.** Kurva jerapan K lapisan atas tanah Inceptisols, Vertisols, dan Alfisols dari Jawa



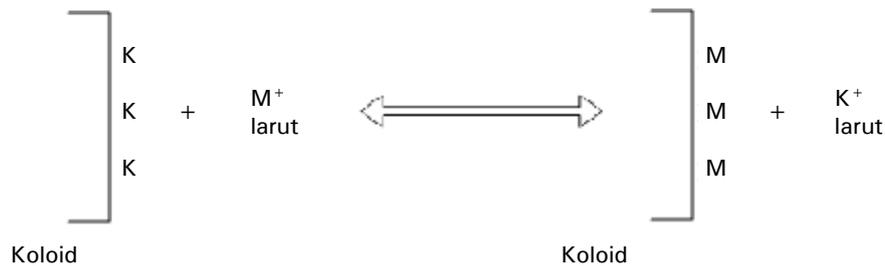
**Gambar 5.** Reaksi keseimbangan K di dalam tanah

kita dapat memenuhi sebagian atau seluruh kebutuhan K tanaman dari tanah dan sisanya dari pupuk. Peluang ini terutama ditujukan untuk tanah-tanah yang mengandung total K tinggi, yaitu untuk tanah-tanah yang mengandung smektit tinggi.

Pengelolaan tanah secara umum adalah berbagai upaya agar K selalu tersedia bagi tanaman. Bila K tersedia itu dianggap sebagai bentuk  $K_i$  dan  $K_{dd}$  maka pengelolaan tanah identik dengan upaya untuk mempertahankan reaksi keseimbangan antara  $K_i$  dan  $K_{dd}$ , yaitu reaksi 4 desorpsi (*desorption*), 5 jerapan (*adsorption*), dan 6 serapan tanaman atau pencucian (*uptake/leaching*) seperti yang tertera

pada Gambar 5. Bila keseimbangan ini terganggu, misal laju reaksi 4 lebih rendah daripada reaksi 5+6 maka tanaman akan mengalami kekahatan K. Dengan demikian maka prinsip dari pengelolaan K tanah adalah meningkatkan reaksi 1, 2, dan 4 serta mengurangi reaksi 3, 5, dan pencucian sehingga  $K_i$  dapat diserap oleh tanaman secara maksimal dan berkesinambungan.

Pemberian pupuk K dapat meningkatkan  $K_i$  tanah sehingga reaksi 5 dan 6 meningkat (Nursyamsi *et al.*, 2008). Pemberian bahan organik dapat mengurangi kehilangan K karena tercuci, meningkatkan reaksi 5 dan reaksi 4 sehingga kemampuan tanah untuk selalu



**Gambar 6. Reaksi pertukaran K yang terjerap di permukaan koloid dengan kation lain ( $M^+$ )**

mensuplai K ke dalam pool  $K_i$  (daya sangga) terjamin. Selanjutnya pemberian K dengan cara dibenam dalam larikan dekat akar atau diberikan secara bertahap menurut fase tumbuh tanaman juga dapat mengurangi kehilangan K oleh pencucian. Upaya-upaya tersebut selain ditujukan untuk meningkatkan  $K_i$  juga untuk menekan kehilangan K karena pencucian sehingga efisiensi pupuk K meningkat.

Salah satu aspek penting dalam pengelolaan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah. Cara ini cukup efektif terutama untuk tanah-tanah yang didominasi oleh mineral liat smektit karena umumnya tanah ini mengandung K total tinggi tapi tanaman masih tetap menghadapi masalah kekahatan K. Pemanfaatan K tanah prinsipnya adalah berbagai upaya yang bertujuan untuk meningkatkan ketersediaan K tanah dengan memanfaatkan K yang memang sudah ada di dalam tanah. Dengan demikian maka pemanfaatan K tanah dapat dilakukan dengan mempercepat reaksi 1 hancuran dari mineral K (*weathering*), 2 pelepasan dari pool  $K_{td}$  ke pool  $K_{dd}$  (*release*), dan 4 desorpsi dari pool  $K_{dd}$  ke pool  $K_i$  (*desorption*).

### MEKANISME PELEPASAN KALIUM TERFIKSASI MENJADI TERSEDIA BAGI TANAMAN

Pemberian asam oksalat,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , dan  $Fe^{3+}$  dapat mempercepat reaksi 1 (hancuran), 2 (pelepasan), dan 4 (desorpsi) (Nursyamsi *et al.*, 2008) atau reaksi mengarah ke kanan dari reaksi keseimbangan K dalam tanah (Gambar 5).

Reaksi 1 merupakan hancuran mineral primer yang banyak mengandung K menjadi mineral sekunder; reaksi 2 merupakan pelepasan K dari K terfiksasi menjadi  $K_{dd}$ ; sedangkan reaksi 4 merupakan desorpsi K dari  $K_{dd}$  menjadi  $K_i$ . Tanah-tanah yang didominasi oleh mineral liat smektit merupakan mineral sekunder sehingga reaksi yang berpeluang tinggi untuk muncul adalah reaksi pelepasan dan desorpsi, sedangkan reaksi hancuran dari mineral primer hampir tidak ada. Setelah reaksi pelepasan dan desorpsi berlangsung maka tanaman akan dengan mudah menyerap K (absorpsi) untuk kebutuhan hidupnya.

#### Desorpsi

Asam oksalat yang dikeluarkan oleh akar tanaman di sekitar rizosfer (Nursyamsi, 2009a) akan mengalami disosiasi menghasilkan  $H^+$  dan  $HOCCOO^-$ . Selanjutnya  $H^+$  dapat menggeser K yang berada di permukaan kompleks jerapan ( $K_{dd}$ ) atau K yang berada di posisi-p dan e sehingga K lepas ke dalam larutan ( $K_i$ ). Proses tersebut dikenal sebagai proses pertukaran kation (*cation exchange*) seperti yang disajikan pada Gambar 6. Reaksi pertukaran ini mengakibatkan proses desorpsi terjadi. Proses pertukaran sangat mungkin terjadi karena sesuai dengan deret liotropik, jerapan koloid tanah terhadap  $H^+ > K^+$  (Tan, 1998). Selain itu juga konsentrasi  $H^+$  di rizosfer lebih tinggi dibandingkan di *bulk soil* (Marschner, 1997) sehingga berpeluang membebaskan K yang berada pada permukaan kompleks jerapan.

Seperti halnya asam oksalat, ternyata  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , dan  $Fe^{3+}$  juga dapat mengusir K yang

berada di permukaan kompleks jerapan sehingga K lepas ke dalam larutan (Nursyamsi *et al.*, 2008) yang akhirnya proses desorpsi terjadi. Proses pertukaran  $K^+$  oleh  $Fe^{3+}$  juga dapat berlangsung karena berdasarkan deret liotropik, jerapan koloid tanah terhadap  $Fe^{3+} > K^+$  (Tan, 1998). Kation lainnya, yaitu  $Na^+$  dan  $NH_4^+$  meskipun posisinya dalam deret liotropik masing-masing berada disebelah kanan dan sama dengan kation  $K^+$  tetapi tetap berpeluang untuk mengusir K pada kompleks jerapan asalkan konsentrasi kedua kation tersebut di dalam larutan tanah  $> K$  pada kompleks jerapan.

Nursyamsi (2009b) telah melaporkan bahwa asam oksalat,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , dan  $Fe^{3+}$  nyata meningkatkan pelepasan K terfiksasi liat pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. Pemberian asam oksalat + NaOH pH = 7 paling efektif dalam melepaskan K terfiksasi pada Alfisols, sedangkan pemberian  $Na^+$  pada Vertisols. Persentase K yang dapat lepas akibat perlakuan berkisar antara 1.37-36.93% pada Hapludalf Tipik, 1.36-33.25% pada Haplustalf Tipik, 1.78-25.63% pada Endoaquert Kromik, dan 2.66-33.04% pada Endoaquert Tipik (Tabel

3). Urutan persentase pelepasan K akibat perlakuan dari tinggi ke rendah menunjukkan tingkatan jumlah K yang dapat dilepas oleh perlakuan tersebut baik pada Alfisols maupun Vertisols.

### Pelepasan

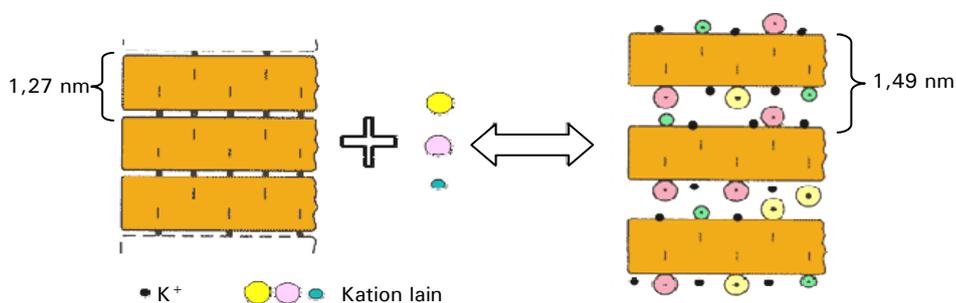
Pelepasan K dari dalam ruang antar lapisan menuju ke permukaan koloid didahului oleh peningkatan jarak basal smektit (mengembang) sehingga K yang tadinya tertutup menjadi terbuka dan siap untuk melakukan pertukaran. Peningkatan jarak basal ini disebabkan oleh karena ion yang terselimuti molekul air melakukan penetrasi ke dalam ruang antar lapisan mineral smektit dimana besarnya peningkatan jarak basal seiring dengan besar radius hidrasi ion yang masuk (Gambar 7). Asam oksalat,  $Na^+$ , dan  $Fe^{3+}$  dapat meningkatkan jarak basal smektit sehingga  $K^+$  menjadi terbuka. Meskipun  $NH_4^+$  tidak meningkatkan jarak basal tapi kation ini dapat berkompetisi dengan  $K^+$  menempati posisi di ruang antar lapisan smektit sehingga K bisa terlepas (Evangelou dan Lumbanraja, 2002).

**Tabel 3. Pengaruh asam oksalat,  $Na^+$ ,  $NH_4^+$ , dan  $Fe^{3+}$  terhadap pelepasan K terfiksasi liat pada tanah Alfisols dan Vertisols**

Perlakuan	Hapludalf Tipik (B1)		Haplustalf Tipik (B4)	
	mg K/g	% dari K total	mg K/g	% dari K total
Kontrol (air)	0,18 d	1,37 d	0,11 e	1,86 e
Asam oksalat	3,58 b	27,13 b	1,53 cd	24,63 cd
(Asam oksalat + NaOH) pH = 7	4,87 a	36,93 a	2,81 a	45,38 a
$Na^+$	3,35 b	25,37 b	2,42 ab	39,06 ab
$NH_4^+$	3,63 b	27,48 b	1,89 bc	30,55 bc
$Fe^{3+}$	3,72 b	28,17 b	1,93 bc	31,20 bc
CV (%)	8,9	8,9	10,4	10,4
	Endoaquert Kromik (B2)		Endoaquert Tipik (B3)	
	mg K/g	% dari K total	mg K/g	% dari K total
Kontrol (air)	0,58 c	2,37 c	1,03 d	3,90 d
Asam oksalat	7,88 a	32,28 a	9,89 bc	37,44 bc
(Asam oksalat + NaOH) pH = 7	7,78 a	31,88 a	8,96 c	33,94 c
$Na^+$	8,32 a	34,08 a	12,77 a	48,35 a
$NH_4^+$	7,57 a	31,02 a	11,17 b	42,32 b
$Fe^{3+}$	7,54 a	30,91 a	9,37 c	35,49 c
CV (%)	11,7	11,7	9,4	9,4

Angka dalam kolom yang sama yang diikuti oleh huruf yang berbeda menunjukkan berbeda nyata pada taraf 5% menurut DMRT.

Sumber : Nursyamsi (2009b)



**Gambar 7. Proses pengembangan mineral liat smektit akibat penambahan asam oksalat dan kation**

Pada saat smektit mengembang maka H<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, dan Fe<sup>3+</sup> masuk ke dalam ruang antar lapisan smektit. Selanjutnya K terfiksasi berpeluang untuk melakukan pertukaran dengan kation-kation tersebut. Pertukaran kation ini menyebabkan K yang tadinya terfiksasi menjadi lepas dan pindah ke permukaan (posisi-p dan e) atau K lepas ke dalam larutan. K yang berada di permukaan dan dalam larutan tanah ini merupakan K dapat segera tersedia bagi tanaman karena tanaman setiap saat bisa menyerapnya untuk proses metabolisme tubuhnya.

Pelepasan K di dalam tanah sesungguhnya terjadi secara alamiah, antara lain disebabkan oleh adanya eksudat asam organik dari akar tanaman atau dari hasil pelapukan bahan organik (Song dan Huang, 1988). Selain itu pelepasan K juga dapat distimulir oleh adanya penurunan konsentrasi K<sup>+</sup> di dalam larutan tanah akibat K diserap oleh tanaman atau tercuci (Rahmatullah dan Mengel, 2000). Bila K diserap tanaman atau tercuci maka keseimbangan K tanah terganggu, yaitu reaksi mengarah ke kanan sehingga proses desorpsi dan pelepasan meningkat.

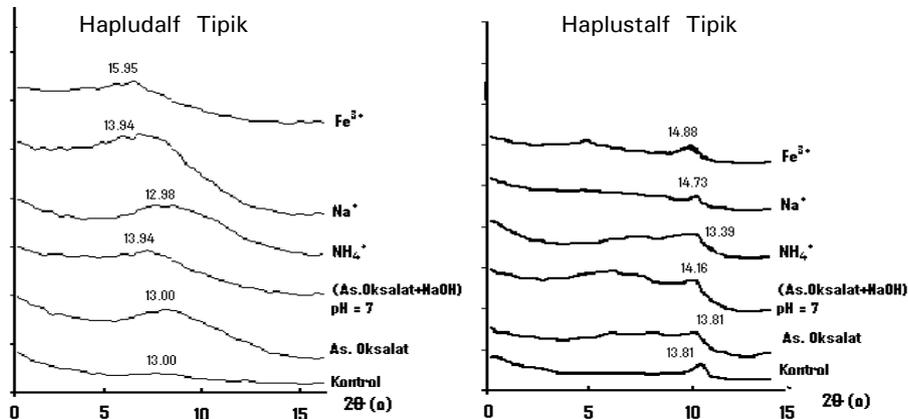
Nursyamsi (2009b) telah melaporkan bahwa bahwa jarak basal smektit tidak berubah akibat pemberian asam oksalat, sedikit menurun akibat pemberian NH<sub>4</sub><sup>+</sup> dan meningkat nyata akibat perlakuan (asam oksalat+NaOH) pH=7, Na<sup>+</sup>, dan Fe<sup>3+</sup>. Peningkatan jarak basal smektit paling signifikan akibat pemberian Fe<sup>3+</sup>, yaitu dari 13.00-15.95 Å pada Haplustalf Tipik,

13.81-14.88 Å pada Haplustalf Tipik (Gambar 8), 12.71-16.07 Å pada Endoaquert Kromik, dan 12.74-16.07 Å pada Endoaquert Tipik (Gambar 9). Di dalam tanah, Fe<sup>3+</sup> selalu diselubungi air sehingga radius ion terhidrasinya tinggi, yaitu sekitar 9.0 Å (Tan, 1998). Akibatnya jarak basal smektit meningkat tajam pada perlakuan kation tersebut. Penetrasi Fe<sup>3+</sup> ke dalam ruang antar lapisan mineral liat smektit menyebabkan jarak basalnya meningkat sehingga K yang terfiksasi dapat dibebaskan dan dapat tersedia bagi tanaman (Tabel 3).

### Absorpsi

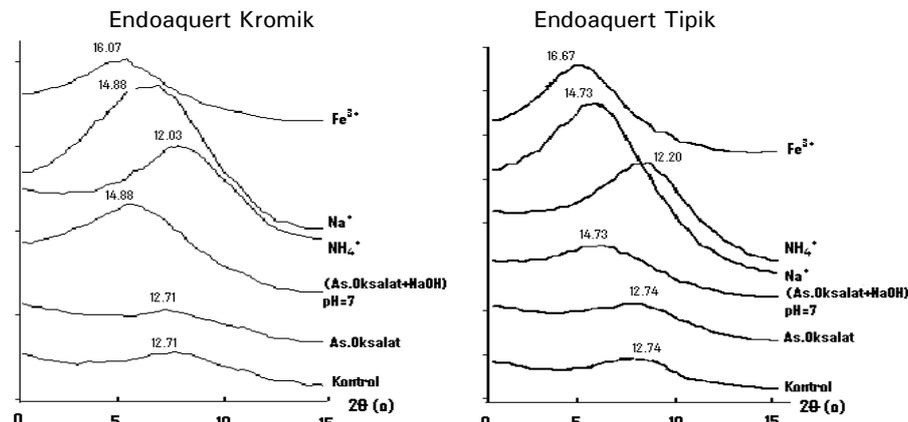
Proses absorpsi hara ke dalam akar tanaman terjadi melalui 2 tahapan, yaitu tahap pertama adalah pergerakan ion dari tanah ke permukaan akar tanaman dan tahap berikutnya adalah serapan ion (*ion uptake*). Tahap pertama mengikuti mekanisme difusi, aliran masa, dan intersepsi akar, sedangkan tahap kedua adalah proses serapan ion pasif dan aktif. Jumlah K<sup>+</sup> yang bergerak dari koloid tanah menuju permukaan akar melalui difusi sekitar 78%, aliran masa 20%, dan intersepsi akar 2% (Havlin *et al.*, 1999).

Difusi dan aliran masa merupakan pergerakan K yang diawali dari proses pelepasan dan desorpsi sehingga K<sup>+</sup> berada dalam larutan dan memungkinkan proses serapan hara berlangsung. Atau dengan kata lain tanaman menyerap K yang berada dalam larutan (K)



Sumber : Nursyamsi (2009b)

**Gambar 8.** Pengaruh asam oksalat,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$  terhadap jarak basal smektit pada Alfisols



Sumber : Nursyamsi (2009b)

**Gambar 9.** Pengaruh asam oksalat,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  terhadap jarak basal smektit pada Vertisols

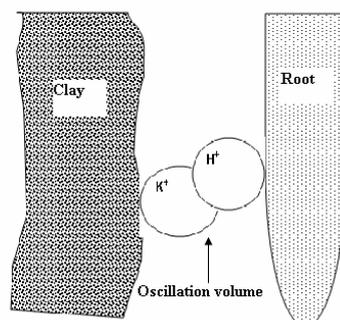
dimana  $K_i$  berasal dari  $K_{dd}$  dan  $K$  terfiksasi. Sementara itu intersepsi akar adalah akar menyerap  $K$  yang berada di permukaan kompleks jerapan ( $K_{dd}$ ) secara langsung melalui proses getaran (*oscillation*) (Havlin *et al.*, 1999) seperti yang disajikan pada Gambar 10.

### PENUTUP

1. Smektit berkontribusi signifikan terhadap jumlah muatan negatif tanah pada tanah-

tanah yang didominasi mineral liat smektit (Vertisols dan sebagian Inceptisols dan Alfisols). Selain itu smektit juga dapat mengendalikan daya sangga dan jerapan maksimum  $K$  tanah.

2. Tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit (0-20 cm) umumnya bertekstur liat, reaksi tanah netral hingga alkalin, kemasaman tanah rendah, dan kejenuhan basa (KB) tinggi.  $K$ -potensial tanah sedang



Sumber : Havlin *et al.* (1999)

**Gambar 10. Mekanisme pertukaran  $H^+$  dari akar dengan  $K^+$  pada permukaan mineral liat**

hingga tinggi, kadar Ca dan  $Mg_{dd}$  tanah sedang hingga tinggi, sedangkan  $K_{dd}$  tanah rendah hingga tinggi, dan kapasitas tukar kation tanah sedang hingga tinggi. Vertisols didominasi oleh mineral liat smektit sedangkan Alfisols dan Inceptisols didominasi oleh smektit dan kaolinit. Meskipun  $K_t$  tanah tinggi tapi sebagian besar K tanah berada dalam bentuk yang tidak dapat dipertukarkan sehingga tidak segera tersedia bagi tanaman.

- Salah satu aspek penting dalam pengelolaan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah. Cara ini cukup efektif terutama untuk tanah-tanah yang didominasi oleh mineral liat smektit karena umumnya tanah ini mengandung K total tinggi tapi hanya sebagian kecil K tanah dapat segera tersedia untuk tanaman. Pemanfaatan K tanah prinsipnya adalah berbagai upaya yang bertujuan untuk meningkatkan ketersediaan K tanah dengan memanfaatkan K yang memang sudah ada di dalam tanah.
- Mekanisme pelepasan kalium terfiksasi menjadi tersedia bagi tanaman pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit sebagian besar melalui reaksi pelepasan dan desorpsi, sedangkan reaksi hancuran hampir tidak ada. Setelah reaksi pelepasan dan desorpsi berlangsung maka tanaman akan dengan mudah menyerap K (absorpsi) untuk kebutuhan hidupnya.

## DAFTAR PUSTAKA

- Allen, B.L. and B.F. Hajek. 1989. Mineral Occurrence in Soil Environments. Pp 199-278. *In* Minerals in Soil Environments. Second Edition. Soil Science Society of America Madison, Wisconsin, USA.
- Bingham, F.T., J.R. Sims, and A.L. Page. 1965. Retention of acetate by montmorillonite. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 29:670-672.
- Borchardt, G. 1989. Smectites. Pp 675-727. *In* Minerals in Soil Environments. Second Edition. Soil Science Society of America Madison, Wisconsin, USA.
- Evangelou, V.P. and J. Lumbanraja. 2002. Ammonium-potassium-calcium exchange on vermiculite and hydroxy-aluminum vermiculite. *SSSAJ* 66: 445-455.
- Ghousikar, C.P. and D.W. Kendre. 1987. Potassium supplying status of some soils of Vertisols type. *Potash Review* No. 5/1987. International Potash Institute, Switzerland.
- 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.
- Hendricks, S.B., R.A. Nelson, and L.T. Alexander. 1940. Hydration mechanism of the clay mineral montmorillonite,

- saturated with various cations. J. Am. Chem. Soc. 62:1457-1464.
- Hofmann, U.K., K. Endell, and D. Willm. 1933. Kristall struktur und Quellung von Montmorillonit. Z. Kristallogr. 86:340-348.
- Lembaga Penelitian Tanah. 1966. Peta Tanah Tinjau Propinsi Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur, Skala 1:250.000. Lembaga Penelitian Tanah, Bogor.
- Marschner, H. 1997. Mineral Nutrition of Higher Plants. Second Edition. Academic Press, Harcourt Brace & Company, Publisher. Tokyo.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, and A. Sofyan. 2007. Dominant soil characteristics influencing available potassium on smectitic soils. Indonesian Journal of Agriculture 1(2):121-131.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan. 2008. Pengaruh asam oksalat,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$  terhadap ketersediaan K pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. Jurnal Tanah Tropika 14(1):33-40.
- Nursyamsi, D. 2009a. Pengaruh kalium dan varietas jagung terhadap eksudat asam organik dari akar, serapan N, P, dan K tanaman, dan produksi brangkasan jagung (*Zea mays* L.). Jurnal Agronomi Indonesia 37(2):107-114.
- Nursyamsi, D. 2009b. Effect of oxalic acid,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , and  $\text{Fe}^{3+}$  on release of fixed potassium and basal distance of smectite in smectitic soils. Journal of Tropical Soils 14(3):177-184.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan. 2009. Jerapan dan pengaruh  $\text{Na}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ , dan  $\text{Fe}^{3+}$  terhadap ketersediaan K pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. Jurnal Tanah dan Iklim 28:69-82.
- Nursyamsi, D. 2010. Identification of nutrients deficiencies at calcareous soils for maize. Journal of Tropical Soils 15(3): 203-212.
- Prasetyo, B.H., N. Suharta, and Hikmatullah. 2001. Chemical and mineralogical properties of Ultisols of Sasamba area, East Kalimantan. Indonesian Journal Agricultural Science, Agency for Agricultural Research and Development 2(2): 37-47.
- Prasetyo, B.H., D. Subardja, dan B. Kaslan. 2005. Ultisol bahan volkan andesitik: Diferensiasi potensi kesuburan dan pengelolaannya. Jurnal Tanah dan Iklim 23:1-12.
- Pusat Penelitian Tanah. 1983. Term of Reference Type A. Publ. P3MT-PPT, Bogor.
- 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.
- Rahmatullah dan K. Mengel. 2000. Potassium release from mineral structures by  $\text{H}^+$  ion resin. Geoderma 96:291-305.
- Song, S.K. and P.M. Huang. 1988. Dynamic of potassium release from potassium-bearing minerals as influenced by oxalic and citric acid. SSSAJ 52:383-390.
- 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.
- Tan, K.H. 1998. Principles of Soil Chemistry. Third Edition Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc., New York.