

TEKNOLOGI PENINGKATAN EFISIENSI PEMUPUKAN K PADA TANAH-TANAH YANG DIDOMINASI SMEKTIT

Technology for Increasing Efficiency of K Fertilization on Smectitic Soils

Dedi Nursyamsi

ddnursyamsi@yahoo.com

Balai Penelitian Pertanian Lahan Rawa, Jl. Kebun Karet, Loktabat, Banjarbaru 70712

Naskah diterima 14 Mei 2012; hasil evaluasi 18 Mei 2012; hasil perbaikan 5 Juni 2012

ABSTRAK

Tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit mempunyai penyebaran yang cukup luas di tanah air, yaitu lebih dari 2,12 juta ha (Vertisol sekitar 2,12 juta ditambah Inceptisol dan Alfisol yang bersubgrup vertik). Tanah ini umumnya mengandung K total tinggi tapi hanya sebagian kecil K tanah dapat segera tersedia untuk tanaman sehingga efisiensi pemupukan K masih rendah. Makalah ini membahas beberapa teknologi yang dapat meningkatkan efisiensi pemupukan K pada tanah tersebut. Salah satu aspek penting dalam upaya peningkatan efisiensi pemupukan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah untuk mengurangi kebutuhan pupuk K yang harus ditambahkan dari pupuk. 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. Penggunaan tanaman yang akarnya banyak mengeluarkan eksudat asam organik dan pupuk yang mengandung kation NH_4^+ , Na^+ , dan Fe^{3+} merupakan teknologi yang sesuai dan efektif meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk K untuk tanah-tanah tersebut.

Kata kunci: Efisiensi pemupukan K, tanah yang didominasi smektit, teknologi

ABSTRACT

Distribution of smectitic soils in Indonesia is quite large, i.e. more than 2.12 million ha consisting of about 2.12 million ha of Vertisols and some vertic subgroup of Alfisols and Inceptisols. The soils commonly contain high amount of total K, however it's availability is still low so that the efficiency of K fertilizer in the soils is low as well. The paper discuss several technologies which could increase the efficiency of K fertilizer in smectitic soils. The use of potential K occurring in soils is one alternative to increase the efficiency of K in order to reduce K requirement from fertilizer. This attempt is quite effective for smectitic soils because they already contain high amount of total K but the plants still suffer K deficiency problem. Use of plants with their roots can produce a lot of organic acid exudates as well as fertilizer containing NH_4^+ , Na^+ , and Fe^{3+} cations are the suitable and effective technologies to increase the efficiency of K fertilizer in smectitic soils.

Keywords: Efficiency of K fertilization, smectitic soils, technologies

Kalium merupakan hara makro yang dibutuhkan tanaman dalam jumlah banyak setelah N dan P. Umumnya K diserap tanaman dalam bentuk K larut (*soluble K*) yang berada dalam reaksi keseimbangan dengan K dapat dipertukarkan (*exchangeable K*) dan K tidak dapat dipertukarkan (*non-exchangeable K*). Kalium tidak dapat dipertukarkan meliputi K terfiksasi dan K struktural (Havlin *et al.*, 1999). Bentuk K larut dan dapat dipertukarkan merupakan bentuk K yang cepat tersedia sehingga sering disebut

sebagai K tersedia atau K aktual. Sementara itu bentuk K tidak dapat dipertukarkan merupakan bentuk K yang lambat tersedia sehingga disebut sebagai K potensial. Tanaman akan mengalami kekahatan apabila K aktual di dalam tanah saat tanaman tumbuh lebih rendah dari batas kritisnya (K yang dibutuhkan tanaman untuk pertumbuhannya). Misalnya batas kritis K tanah untuk jagung, yaitu 0,20 me/100g di tanah netral (Sofyan *et al.*, 2003), 0,41 me/100g di tanah Ultisol Lampung, dan 0,72 me/100g di tanah Oxisol Sitiung (Sulaeman *et al.*, 2000).

Ketersediaan K bagi tanaman tergantung aspek tanah dan parameter iklim yang meliputi: jumlah dan jenis mineral liat, kapasitas tukar kation, daya sangga, kelembaban, suhu, aerasi dan pH tanah (Havlin *et al.*, 1999). Selain faktor tanah dan iklim, spesies dan varietas tanaman juga berpengaruh terhadap serapan K, dimana tanaman yang toleran memerlukan K dalam jumlah sedikit dan sebaliknya tanaman sensitif memerlukan K dalam jumlah banyak. Salah satu mekanisme ketoleranan tanaman terhadap kekurangan hara adalah dengan cara mengeluarkan eksudat asam organik di sekitar akar (*rhizosphere*), seperti pada jagung (Nursyamsi *et al.*, 2002) dan padi (Syarif, 2005). Selanjutnya asam organik dapat melarutkan hara (P, K, Fe, Mn, dan lain-lain) yang sebelumnya tidak tersedia menjadi tersedia bagi tanaman (Marschner, 1997). Dengan demikian maka pengelolaan hara K untuk meningkatkan produksi tanaman perlu memperhatikan faktor tanah, iklim, dan tanaman.

Ketersediaan K di dalam tanah tergantung kepada proses jerapan (*sorption*) dan fiksasi (*fixation*) serta desorpsi (*desorption*) dan pelepasan (*release*) K dalam tanah yang dikendalikan terutama oleh jenis dan jumlah mineral liat (Brady, 1984). Mineral liat tipe 2:1 mempunyai jerapan (baik jumlah maupun kekuatannya) terhadap K dan dapat melepaskan K paling tinggi dibandingkan dengan mineral liat lainnya seperti liat tipe 2:1:1, 1:1, oksida, dan alofan. Diantara mineral liat tipe 2:1 ternyata beidelit (kelompok smektit) mempunyai kapasitas fiksasi paling tinggi. Penelitian yang dilaksanakan di tanah Vertisol di India yang didominasi oleh mineral liat smektit menunjukkan bahwa beidelit mempunyai fiksasi K paling tinggi dibandingkan montmorilonit, mika, illit, dan vermikulit (Murthy *et al.*, 1987).

Tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit mempunyai prospek yang cukup besar untuk dikembangkan menjadi lahan pertanian tanaman pangan asal disertai dengan pengelolaan tanaman dan tanah yang tepat. Tanah ini dapat mengembang (*swelling*) pada

saat basah dan di saat kering tanah mengkerut (*shrinking*) sehingga terjadi retakan. Tanah yang mempunyai sifat demikian umumnya meliputi tanah Vertisol dan tanah yang mempunyai sifat vertik lainnya (sebagian Inceptisol dan Alfisol). Tanah-tanah tersebut mempunyai penyebaran yang cukup luas di tanah air, yaitu lebih dari 2,12 juta ha (Vertisol sekitar 2,12 juta ha ditambah sebagian Inceptisol dan Alfisol) yang tersebar di wilayah Jawa (Jabar, Jateng, dan Jatim), Sulawesi (Sulsel, Sulteng, dan Gorontalo), Maluku (Seram), dan Nusa Tenggara (Lombok dan Sumba) (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 2000).

Walaupun kadar K total tanah (K potensial) tinggi tapi ketersediaan K bagi tanaman (K aktual) sering menjadi masalah karena K difiksasi oleh mineral liat tipe 2:1, seperti dari golongan smektit (Borchardt, 1989) dan vermikulit (Douglas, 1989) yang dominan di tanah tersebut. Penelitian yang dilaksanakan di India menunjukkan bahwa tanah-tanah Vertisol mempunyai kapasitas fiksasi K (*K-fixing capacity*) dan daya sangga terhadap K (*K-potencial buffering capacity*, PBC^K) yang sangat tinggi (Ghousikar and Kendre, 1987). Oleh karena itu perlu dilakukan berbagai upaya untuk mengatasi fiksasi K tanah sehingga ketersediaannya meningkat bagi tanaman.

EFISIENSI PEMUPUKAN KALIAM

Seperti halnya pupuk N dan P, efisiensi penggunaan pupuk K di tanah pertanian umumnya masih rendah karena K mudah hilang baik melalui proses pencucian maupun fiksasi. Pada tanah-tanah bertekstur ringan dan atau telah mengalami pelapukan lanjut, K mudah hilang tercuci dan keluar dari zone perakaran. Pada tanah-tanah demikian, hara K dapat menjadi pembatas pertumbuhan tanaman sehingga tanaman respon terhadap pemupukan K (Geodert *et al.*, 1975; Sitisubadiyasa *et al.*, 1978; Nursyamsi *et al.*, 2005; dan Nursyamsi, 2006). Sebaliknya pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit yang bertekstur berat, K dapat terfiksasi di ruang antar lapisan

mineral liat tersebut sehingga tanaman masih mengalami kekahatan K dan produksi tanaman tidak optimal (Nursyamsi dan Sutriadi, 2006 dan Nursyamsi, 2010).

Salah satu aspek penting dalam upaya peningkatan efisiensi pemupukan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah sehingga dapat mengurangi kebutuhan pupuk K yang harus ditambahkan. 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. Nursyamsi *et al.* (2007) mengemukakan bahwa hanya sebagian kecil K tanah Inceptisol, Vertisol, dan Alfisol yang mengandung liat dominan smektit dapat segera tersedia untuk tanaman. Hal ini ditunjukkan dengan kadar K larut (K_l) dan K dapat dipertukarkan (K_{dd}) tanah relatif sangat rendah (32-37%) dibandingkan dengan K total (K_t) tanah.

Nursyamsi (2011) menjelaskan bahwa pemanfaatan K tanah prinsipnya adalah berbagai upaya yang bertujuan untuk meningkatkan ketersediaan K tanah dengan memanfaatkan K yang memang sudah ada di dalam tanah. Pemanfaatan K tanah dapat dilakukan dengan mempercepat reaksi hancuran dari mineral K (*weathering*), pelepasan dari bentuk K tidak dapat dipertukarkan (K_{td}) ke bentuk K_{dd} (*release*), dan desorpsi dari bentuk K_{dd} ke bentuk K_l (*desorption*). Pemanfaatan hara tanah, terutama P, dengan cara seperti ini sebenarnya sudah lazim dilakukan pada tanah-tanah yang mempunyai fiksasi P tinggi, tapi untuk hara K pada tanah yang didominasi smektit belum banyak dilakukan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa asam organik dan sejumlah kation (NH_4^+ , Na^+ , dan lain-lain) mempunyai peranan yang sangat penting dalam meningkatkan ketersediaan K tanah. Asam oksalat dan sitrat dapat melepaskan K_{td} menjadi K_{dd} dan K_l pada tanah-tanah yang berbahan induk batu kapur, dimana asam oksalat mempunyai efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan asam sitrat (Zhu and Luo, 1993).

Asam-asam organik, seperti: oksalat, sitrat, malonat, fumarat, malat, suksinat, benzoat, tartarat dan lain-lain merupakan komponen penting dari eksudat akar tanaman yang dikeluarkan di sekitar *rhizosphere*. Akar tanaman jagung yang dipelihara dalam larutan hara (*solution culture*) steril dapat mengeluarkan asam oksalat, fumarat, dan sitrat (Bolton *et al.*, 1993). Penelitian Syarif (2005) pada tanaman padi menunjukkan bahwa akar padi genotipe Gadih Ani-2 dapat mengeluarkan eksudat asam oksalat, asam sitrat, asam format, dan asam suksinat. Demikian pula akar tanaman kedelai dan padi juga dapat mengeluarkan eksudat akar asam oksalat (Nursyamsi *et al.*, 2002).

Proses hancuran mineral muskovit dapat menyebabkan Ca^{2+} dan Na^+ dapat mengantikan posisi K di dalam struktur mineral muskovit (Shidu, 1987). Selain itu NH_4^+ dan K^+ dapat berkompetisi dalam menempati kompleks jerapan di posisi *inner* dari ruang antar lapisan mineral liat tipe 2:1. Kompetisi tersebut sering terjadi terutama di tanah yang didominasi mineral yang mempunyai kapasitas jerapan tinggi terhadap kedua kation tersebut, seperti beidelit dan vermikulit (Bajwa, 1987). Kation lain yang berperan dalam meningkatkan ketersediaan K adalah Na^+ . Ion natrium dari *natrium tetraphenyl boron* dapat melepaskan K terfiksasi menjadi K tersedia di tanah Alfisol, Vertisol, dan Inceptisol (Dhillon dan Dhillon, 1992). Selain itu Na juga dapat mengurangi sebagian kebutuhan pupuk K tanaman tebu pada tanah Vertisol di lahan perkebunan tebu, di Jawa Timur (Ismail, 1997).

Berdasarkan uraian di atas maka salah satu upaya penting dalam meningkatkan efisiensi pemupukan K adalah melalui penggunaan tanaman yang akarnya banyak mengeluarkan eksudat asam organik dan pupuk yang mengandung kation NH_4^+ , Na^+ , dan Fe^{3+} . Teknologi ini merupakan teknologi yang sesuai dan efektif meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk K untuk tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit.

PENGUNAAN TANAMAN PENGHASIL EKSUDAT ASAM ORGANIK

Eksudat asam organik

Salah satu mekanisme tanaman untuk mengatasi stres (misalnya karena keracunan Al, kekurangan hara termasuk hara K, kekeringan, terkena penyakit, dan lain-lain) adalah melalui pengeluaran eksudat dari akar. Eksudat tersebut umumnya merupakan senyawa organik, seperti gula, asam amino, asam organik, dan lain-lain. Asam-asam organik yang merupakan bagian penting dari eksudat akar jagung, padi, dan kedelai antara lain adalah: oksalat, fumarat, malat, sitrat, suksinat, benzoat, akonitat, tartarat, dan glutarat (Bolton *et al.* 1993; Syarif, 2005; dan Nursyamsi *et al.*, 2002).

Nursyamsi *et al.* (2002) telah melakukan penelitian eksudat asam organik dari akar tanaman jagung dan kedelai akibat keracunan Al. Hasilnya menunjukkan bahwa akar jagung varietas PM 95A dan SA 3 serta kedelai varietas Wilis, INPS, Galunggung, dan Kitamusume

mengeluarkan asam oksalat sekitar 116-2278 nmol/BK akar per 24 jam (Tabel 1). Tabel tersebut menunjukkan pula bahwa laju pengeluaran eksudat asam oksalat dari jagung dan kedelai semakin meningkat akibat meningkatnya takaran Al.

Hasil penelitian Nursyamsi (2009a) menunjukkan bahwa asam oksalat merupakan asam organik paling dominan yang dikeluarkan oleh akar tanaman jagung. Selanjutnya Nursyamsi (2009a) menduga laju pengeluaran dan jumlah eksudat akar beberapa varietas jagung di rizosfer dan hasilnya disajikan pada Tabel 2. Tabel tersebut menunjukkan bahwa laju pengeluaran eksudat asam oksalat berkisar antara 0,45 mg/g BK/hari (Wisanggeni) hingga 0,85 mg/g BK/hari (CIMMIT 3330). Sementara itu eksudat asam organik berkisar antara 1,27 mg/g BK/hari (Wisanggeni) hingga 2,13 mg/g BK/hari (CIMMIT 3330). Nilai tersebut jauh melampaui laju pengeluaran asam oksalat varietas PM 95A umur 30 HST pada kultur air yang hanya 240 nmol/g BK/hari atau setara dengan 21,60 µg/g BK/hari (Nursyamsi *et al.*, 2002).

Tabel 1. Laju pengeluaran eksudat asam oksalat dari akar jagung dan kedelai pada perlakuan Al

Tanaman	Perlakuan Al (ppm)			
	0	5	10	30
 nmol/g BK akar/24 jam			
<i>Jagung</i>				
Arjuna	trace	trace	trace	trace
Kalingga	trace	trace	trace	trace
P 3540	trace	trace	trace	trace
SA 5	trace	trace	trace	trace
SA 4	trace	trace	trace	trace
PM 95 A	137 ± 8	222 ± 48	323 ± 55	338 ± 44
SA 3	173 ± 24	197 ± 58	215 ± 28	316 ± 27
Antasena	trace	trace	trace	trace
<i>Kedelai</i>				
Wilis	444 ± 68	576 ± 70	973 ± 232	2.278 ± 74
INPS	trace	216 ± 9	881 ± 21	998 ± 233
Galunggung	908 ± 203	641 ± 101	1.594 ± 339	2.122 ± 335
Kerinci	trace	trace	trace	trace
Kitamusume	116 ± 4	487 ± 105	526 ± 114	2.233 ± 358

Sumber: Nursyamsi *et al.* (2002)

Tabel 2. Prediksi laju pengeluaran dan jumlah eksudat akar beberapa varietas jagung di rizosfer selama satu musim tanam

Varietas	Laju pengeluaran eksudat		Jumlah eksudat di rizosfer	
	Asam oksalat	Asam organik	Asam oksalat	Asam organik
 mg/g BK/hari mg/kg	
Antasena	0,54	1,49	2.545	7.054
CIMMIT 3330	0,85	2,13	4.003	10.064
Wisanggeni	0,45	1,27	2.126	6.014
Lamuru	0,53	1,39	2.484	6.575
Pioneer 21	0,53	1,38	2.491	6.534

Sumber: Nursyamsi (2009a)

Jumlah eksudat asam oksalat di rizosfer berkisar antara 2.126 mg/kg (Wisanggeni) hingga 4.003 mg/kg (CIMMIT 3330), sedangkan asam organik sekitar 6.014-10.064 mg/kg berturut-turut untuk Wisanggeni dan CIMMIT 3330. Nilai tersebut merupakan akumulasi eksudat akar selama satu musim. Meskipun akumulasi eksudat tinggi tapi tanaman tidak keracunan karena eksudat asam oksalat keluar secara bertahap. Fenomena ini justru menguntungkan tanaman karena itu berarti pelepasan K dari bentuk tidak dapat dipertukarkan menjadi bentuk larut sedikit demi sedikit sesuai dengan yang dibutuhkan tanaman.

Hasil penelitian lainnya menunjukkan bahwa akar tanaman jagung yang dipelihara dalam larutan hara (*solution culture*) steril dapat mengeluarkan asam oksalat, fumarat, dan sitrat masing-masing sekitar 3100, 4710, dan 530 $\mu\text{g/g/hari}$ atau sekitar 24,59, 40,58, dan 2,76 $\mu\text{mol/g/hari}$ (Bolton *et al.*, 1993). Penelitian Syarif (2005) pada tanaman padi menunjukkan bahwa akar padi genotipe Gaduh Ani-2 dapat mengeluarkan eksudat asam oksalat 1,28, asam sitrat 0,53, asam format 0,61, dan asam suksinat 0,27 $\mu\text{mol/g/hari}$. Akar tanaman kedelai juga dapat mengeluarkan eksudat akar asam oksalat sekitar 0,11-2,28 $\mu\text{mol/g/hari}$. Selain itu asam-asam organik, terutama asam oksalat, malonat, dan fumarat juga banyak terdapat di dalam akar tanaman seperti padi, jagung, dan kedelai masing-masing sekitar 2,23-12,47; 3,32-14,08; dan 2,12-11,06 $\mu\text{mol/g}$ (Nursyamsi *et al.*, 2002). Tampak bahwa eksudat asam organik yang dikeluarkan oleh akar tanaman jagung selama satu hari jauh lebih besar

dibandingkan dengan asam organik yang masih tersisa dalam jaringan akar tanaman. Hal ini menunjukkan bahwa tanaman cenderung segera mengeluarkan sisa metabolisme tubuhnya (misalnya asam organik) dalam bentuk eksudat akar.

Peran asam oksalat

Asam oksalat merupakan bagian penting dan dominan dalam eksudat asam organik yang dikeluarkan oleh akar jagung dan kedelai (Tabel 1). Selanjutnya asam oksalat mampu melepaskan sebagian K terfiksasi menjadi tersedia untuk pertumbuhan tanaman yang pada gilirannya dapat meningkatkan hasil tanaman. Asam oksalat nyata meningkatkan pelepasan K terfiksasi tanah-tanah yang didominasi smektit (Nursyamsi 2009b). Asam oksalat dapat mengubah K yang berada dalam bentuk K_{td} menjadi K_{dd} dan K_{i} baik di Alfisol maupun Vertisol (Nursyamsi *et al.*, 2008a). Selain itu asam oksalat juga dapat meningkatkan ketersediaan N dan P yang ditandai oleh peningkatan serapan N di tanah Alfisol dan P di tanah Vertisol sehingga bobot berangkas kering tanaman juga meningkat (Nursyamsi *et al.*, 2008b).

Telah dikemukakan sebelumnya bahwa sebagian besar K di semua tanah yang diuji berada dalam bentuk tidak dapat dipertukarkan sehingga dalam jangka pendek tidak tersedia bagi tanaman (Nursyamsi *et al.*, 2008a). Uraian di atas menunjukkan bahwa penggunaan asam oksalat dapat membuat tanaman mampu memanfaatkan K yang tadinya tidak tersedia menjadi tersedia bagi tanaman (Nursyamsi *et al.*,

2008b). Kalium yang berada di posisi ruang antar lapisan (*interlayer* = i), retakan (*crack* = c), ganjalan (*wedge* = w), pinggir (*edge* = e), dan tangga (*step* = s) tidak bisa atau sulit melakukan pertukaran sehingga disebut sebagai K_{idd} sedangkan yang berada di posisi lempeng (*planar* = p) mudah melakukan pertukaran sehingga disebut sebagai K_{dd} (Kirkman *et al.*, 1994). Mengingat jumlah K yang dapat dilepaskan oleh asam oksalat tinggi maka sesungguhnya bukan hanya K yang berada di posisi-p saja yang lepas tapi sangat mungkin sebagian atau semua K yang berada di posisi-e, s, c, dan w juga lepas. Pemberian asam oksalat dapat mempercepat proses hancuran, pelepasan, dan desorpsi atau reaksi mengarah ke kanan dari reaksi keseimbangan K dalam tanah (Nursyamsi, 2011). Asam oksalat bersifat masam sehingga dapat mempercepat proses hancuran. Demikian pula asam oksalat dapat melarutkan K yang berada di posisi-p dan sebagian posisi-e atau mempercepat proses desorpsi. Selain itu pemberian asam oksalat yang dibarengi penambahan NaOH hingga pH=7 dapat meningkatkan jarak basal smektit sehingga reaksi pelepasan juga berlangsung (Nursyamsi, 2011).

PENGGUNAAN PUPUK Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+}

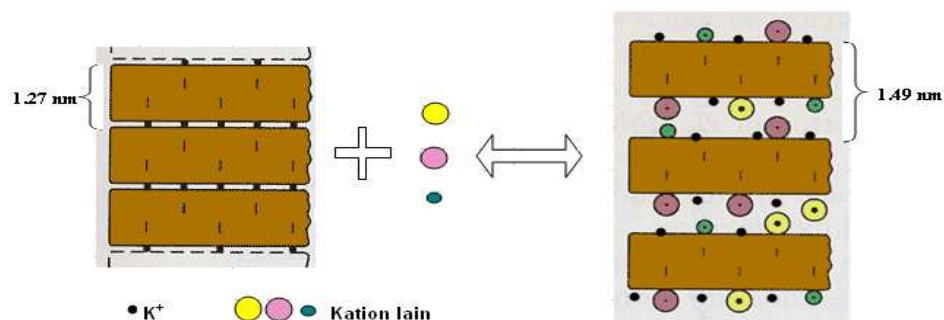
Pelepasan K tanah

Kation Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} dapat melepaskan K yang terfiksasi di dalam ruang antar lapisan mineral liat smektit sehingga

menjadi tersedia bagi tanaman (Nursyamsi, 2009b). Nursyamsi (2011) melaporkan bahwa pelepasan K dari dalam ruang antar lapisan menuju ke permukaan koloid melalui tahapan: (1) Peningkatan jarak basal smektit (pengembangan) dan (2) Reaksi pertukaran kation. Peningkatan jarak basal 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 1). Kation Na^+ , dan Fe^{3+} dapat meningkatkan jarak basal smektit sehingga K^+ menjadi terbuka dan siap melakukan reaksi pertukaran (Nursyamsi, 2009b). Meskipun NH_4^+ tidak meningkatkan jarak basal (Nursyamsi, 2009b) tapi kation ini dapat berkompetisi dengan K^+ menempati posisi di ruang antar lapisan smektit sehingga K bisa terlepas (Evangelou and Lumbanraja, 2002).

Pada saat smektit mengembang maka H^+ , Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} 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



Sumber: Nursyamsi (2011)

Gambar 1. Proses pengembangan mineral liat smektit akibat penambahan asam oksalat dan kation

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^+ 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 sedikit menurun akibat pemberian NH_4^+ dan meningkat nyata akibat perlakuan Na^+ dan Fe^{3+} . Peningkatan jarak basal smektit paling signifikan akibat pemberian Fe^{3+} , yaitu dari 13,00-15,95 Å pada Haplustalf Tipik, 13,81-14,88 Å pada Haplustalf Tipik, 12,71-16,07 Å pada Endoaquert Kromik, dan 12,74-16,07 Å pada Endoaquert Tipik. Penelitian Tan (1978) yang dilaksanakan pada tanah yang mengandung smektit dan ilit juga menunjukkan bahwa asam organik (humik dan fulvik) dapat meningkatkan jarak basal mineral tersebut dari 11-11,9 Å (asam humik) dan 11-12,3 Å (asam fulvik).

Di dalam tanah, Fe^{3+} selalu diselimuti 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^{3+} ke dalam ruang antar lapisan mineral liat smektit menyebabkan jarak basalnya meningkat sehingga K yang terfiksasi dapat dibebaskan dan dapat tersedia bagi tanaman. Penelitian Nursyamsi (2009b) menunjukkan bahwa akibat peningkatan jarak basal oleh Fe^{3+} pada Alfisol dan Vertisol maka jumlah K dapat dibebaskan sekitar 28-35%. Sementara itu Tan (1978) menunjukkan bahwa asam organik (humik dan fulvik) dapat membebaskan sekitar 25% K terfiksasi pada tanah yang mengandung smektit dan ilit.

Peran kation Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+}

Nursyamsi *et al.* (2009b) melaporkan bahwa kation Na^+ dan NH_4^+ tidak berpengaruh nyata terhadap K larut (K_i), K dapat

dipertukarkan (K_{dd}), dan K tidak dapat dipertukarkan (K_{td}) tanah Alfisol. Sementara itu Fe^{3+} sangat nyata ($P > 0.99$) meningkatkan K_i dan K_{dd} sehingga sangat nyata pula menurunkan K_{td} tanah. Pada tanah Vertisol, perlakuan Na^+ nyata meningkatkan K_i tapi tidak berpengaruh nyata terhadap K_{dd} sehingga tidak berpengaruh nyata terhadap K_{td} tanah. Perlakuan NH_4^+ tidak berpengaruh nyata terhadap K_i tapi nyata meningkatkan K_{dd} sehingga nyata menurunkan K_{td} tanah. Sementara itu Fe^{3+} berpengaruh sangat nyata terhadap semua peubah yang diuji. Perlakuan Fe^{3+} sangat nyata meningkatkan K_i dan K_{dd} sehingga sangat nyata pula menurunkan K_{td} tanah (Tabel 3).

Tabel 3. Pengaruh kation Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap bentuk K_i , K_{dd} , K_{td} setelah inkubasi 3 bulan pada Alfisol dan Vertisol

Perlakuan	Bentuk K tanah		
	K_i	K_{dd}	K_{td}
 mg/kg		
<i>Alfisol</i>			
Kontrol	13,88 b	56,50 b	318 b
Na^+	16,75 b	64,75 b	307 b
NH_4^+	16,25 b	67,75 b	304 b
Fe^{3+}	58,13 a	73,00 a	257 a
CV (%)	13,6	12,3	3,6
<i>Vertisol</i>			
Kontrol	27,75 b	149,25 c	314 b
Na^+	38,63 b	152,50 bc	299 b
NH_4^+	33,38 b	165,13 b	292 b
Fe^{3+}	142,13 a	165,38 a	183 a
CV (%)	12,4	12,1	4,6

Sumber: Nursyamsi *et al.* (2009b)

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

Pengaruh perlakuan terhadap ketiga peubah yang diuji lebih kentara pada tanah Vertisol dibandingkan tanah Alfisol. Hal ini disebabkan antara lain karena kadar K total tanah Vertisol jauh lebih tinggi dibandingkan Alfisol (Nursyamsi *et al.*, 2007). Jumlah K yang lepas dari bentuk K_{td} menjadi K_{dd} (*release*) dan dari K_{dd} menjadi K_i (*desorption*) pada Vertisol

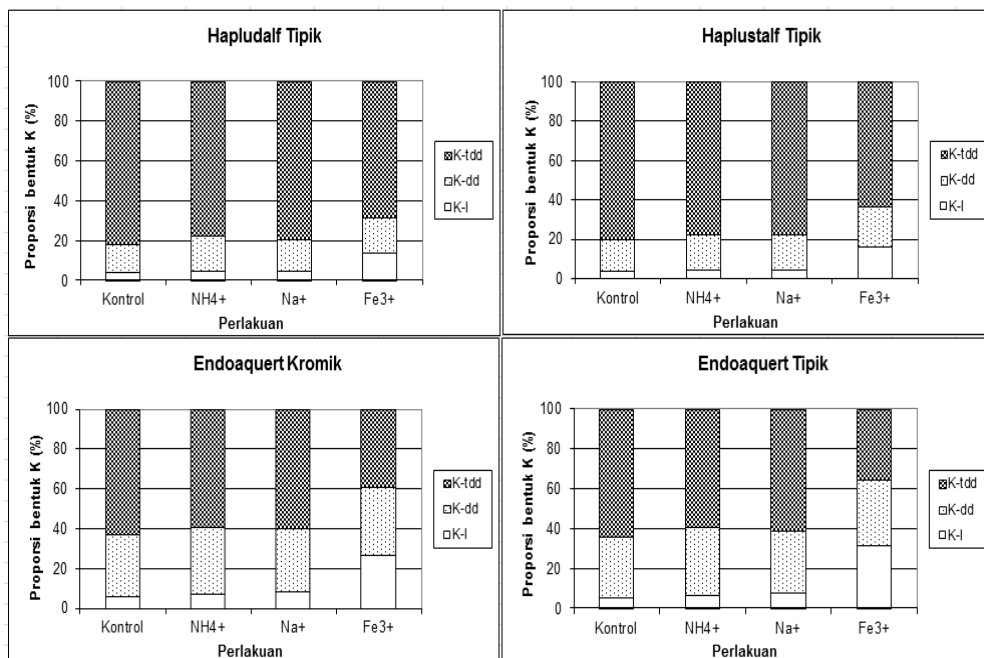
lebih tinggi dibandingkan Alfisol. Umumnya K yang lepas dari K_{td} menjadi K_{dd} adalah K yang berada di posisi-i, w, dan c, sedangkan K yang lepas dari K_{dd} menjadi K_i adalah K yang berada di posisi-p dan e (Kirkman *et al.*, 1994).

Pengaruh kation terhadap perubahan proporsi bentuk-bentuk K tanah Alfisol dan Vertisol disajikan pada Gambar 2. Diantara kation yang dicoba ternyata Fe^{3+} paling efektif dalam melepaskan K tidak tersedia (K_{td}) menjadi K tersedia (K_{dd} dan K_i) di kedua jenis tanah tersebut. Gambar tersebut menunjukkan bahwa jumlah K_i dan K_{dd} meningkat sedangkan K_{td} menurun akibat pemberian kation ke dalam tanah. Tingkat kekuatan kation dalam melepaskan K tanah dari tinggi ke rendah adalah: $Fe^{3+} > NH_4^+ > Na^+$ baik pada Alfisol maupun Vertisol. Berdasarkan jumlah K yang dilepas, maka dapat diduga bahwa Na^+ hanya dapat mengusir K yang berada di posisi-p, sedangkan NH_4^+ selain K di posisi-p juga di posisi-e dan sebagian kecil K yang berada di posisi-i. Sementara itu Fe^{3+} dapat melepaskan K yang berada di posisi-p dan e dan sejumlah besar K di posisi-i (Nursyamsi *et al.*, 2009b).

PERAN ASAM OKSALAT DAN KATION Na^+ , NH_4^+ , DAN Fe^{3+} DALAM MENINGKATKAN EFISIENSI PUPUK K

Untuk mempelajari peran asam oksalat dan kation Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} dalam meningkatkan efisiensi pupuk K pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit, Nursyamsi *et al.* (2008b) telah melaksanakan penelitian di tanah Alfisol dan Vertisol yang hasilnya masing-masing disajikan pada Tabel 4 dan 5.

Asumsi kebutuhan pupuk K untuk mencapai hasil 9 t/ha sebesar 150 kg K/ha berdasarkan hasil penelitian Dierolf *et al.* (2001), yaitu tanaman jagung memerlukan 75 kg K untuk mencapai produksi 4.5 t/ha biji kering. Jagung hibrida P-21 mempunyai potensi produksi biji kering sekitar 9 t/ha sehingga memerlukan hara K dari tanah sebesar 150 kg/ha untuk mencapai pertumbuhan yang optimal. Nilai tersebut hampir sama dengan perhitungan kebutuhan pupuk K berdasarkan batas kritis K tanah untuk jagung 0,2 me K/100g (Dierolf *et al.*, 2001), yaitu sebesar 156 kg K/ha.



Sumber: Nursyamsi *et al.* (2009b)

Gambar 2. Pengaruh Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap proporsi bentuk-bentuk K tanah Alfisol dan Vertisol

Tabel 4. Pengaruh asam oksalat, Na⁺, NH₄⁺, dan Fe³⁺ terhadap K-tersedia tanah, serapan N, P, dan K tanaman, persen hasil tanaman, dan jumlah K yang perlu ditambahkan (pupuk) pada Alfisol

Perlakuan	K-tersedia tanah	Serapan hara tanaman			Persen hasil***	K yang perlu ditambahkan (pupuk)	Peningkatan efisiensi pupuk
		N	P	K			
	 kg/ha			%	kg/ha	%
<i>Hapludalf Tipik</i>							
Asam oksalat (ppm)							
0	101	172	5,1	22,1	100	110	0,00
1.000	99	218	6,3	21,6	113	111	-0,91
Kation (50% jerapan mak)							
Kontrol	101	229	6,4	20,9	100	109	0,00
Na	118	196	6,4	27,9	98	103	5,50
NH ₄	131	*	*	*	*	98	10,09
Besi (ppm)							
0	101	379	22,7	148,9	100	109	0,00
125	103	418	23,6	149,2	96	109	0,00
5.000	133	**	**	**	**	97	11,01
<i>Haplustalf Tipik</i>							
Asam oksalat (ppm)							
0	136	227	30,7	92,8	100	96	0,00
1.000	143	247	31,3	109,3	98	93	3,13
Kation (50% jerapan mak)							
Kontrol	129	329	27,9	88,9	100	98	0,00
Na	145	311	19,9	87,6	105	92	6,12
NH ₄	145	*	*	*	*	92	6,12
Besi (ppm)							
0	129	533	47,8	276,9	100	98	0,00
125	131	617	59,3	273,4	106	98	0,00
5.000	163	**	**	**	**	85	13,27

Sumber: Nursyamsi *et al.* (2008b)

*Perlakuan NH₄⁺ tidak diuji karena N yang diserap tanaman tidak dapat dibedakan, apakah berasal dari perlakuan penambahan NH₄⁺ atau pupuk urea, **Tidak ada data karena tanaman mati keracunan, dan

***Persen hasil = (Y_{perlakuan}/Y₀) X 100%.

Pada Hapludalf Tipik, asam oksalat takaran 1000 ppm tidak berpengaruh terhadap ketersediaan K tanah sehingga tidak berpengaruh pula terhadap kebutuhan K dari pupuk. Namun demikian asam oksalat dapat meningkatkan serapan N dan P tanaman sehingga hasil biji kering juga meningkat sekitar 13%. Perlakuan Na⁺, NH₄⁺, dan Fe³⁺ dapat meningkatkan ketersediaan K tanah sehingga menurunkan kebutuhan pupuk K tanaman atau efisiensi pupuk meningkat berturut-turut 5,50, 10,09, dan 11,01%. Namun demikian kation-kation tersebut tidak berpengaruh terhadap serapan hara, kecuali serapan N tanaman meningkat akibat pemberian Fe³⁺. Sementara itu

pada Haplustalf Tipik, asam oksalat dapat meningkatkan ketersediaan K sehingga kebutuhan pupuk K menurun dan efisiensi pupuk meningkat 3,13%, meningkatkan serapan N dan K tanaman, tapi tidak berpengaruh terhadap hasil tanaman. Perlakuan Na⁺, NH₄⁺, dan Fe³⁺ meningkatkan ketersediaan K sehingga kebutuhan pupuk K menurun dan efisiensi pupuk peningkat sebesar 6,12, 6,12, dan 13,27%, meningkatkan hasil biji kering, dan Fe³⁺ meningkatkan serapan N dan P tanaman (Tabel 4).

Pada Endoaquert Kromik, asam oksalat meningkatkan ketersediaan K sehingga menurunkan kebutuhan pupuk K atau efisiensi pupuk

Tabel 5. Pengaruh asam oksalat, Na⁺, NH₄⁺, dan Fe³⁺ terhadap K-tersedia tanah, serapan N, P, dan K tanaman, persen hasil tanaman dan jumlah K yang perlu ditambahkan dari pupuk pada Vertisol

Perlakuan	K-tersedia tanah	Serapan tanaman			Persen hasil***	K yang perlu ditambahkan (pupuk)	Peningkatan efisiensi pupuk
		N	P	K			
	kg/ha			%	kg/ha	%
<i>Endoaquert Kromik</i>							
Asam oksalat (ppm)							
0	310	377	18,2	203,1	100	26	0,00
1000	337	469	24,9	270,3	110	15	42,31
Kation (50% jerapan mak)							
Kontrol	331	508	25,3	268,0	100	17	0,00
Na	341	459	24,8	300,9	95	14	17,65
NH ₄	366	*	*	*	*	4	76,47
Besi (ppm)							
0	331	883	58,6	454,2	100	17	0,00
125	333	988	79,3	593,1	114	17	0,00
5000	370	**	**	**	**	2	88,24
<i>Endoaquert Tipik</i>							
Asam oksalat (ppm)							
0	284	426	54,3	209,2	100	36	0,00
1000	290	474	69,5	209,7	111	34	5,56
Kation (50% jerapan mak)							
Kontrol	269	498	68,4	215,1	100	42	0,00
Na	274	488	63,4	225,2	92	40	4,76
NH ₄	304	*	*	*	*	29	30,95
Besi (ppm)							
0	269	393	43,6	163,8	100	42	0,00
125	270	417	44,8	236,3	114	42	0,00
5000	294	**	**	**	**	32	23,81

Sumber: Nursyamsi *et al.* (2008b)

*Perlakuan NH₄⁺ tidak diuji karena N yang diserap tanaman tidak dapat dibedakan, apakah berasal dari perlakuan penambahan NH₄⁺ atau pupuk urea, **Tidak ada data karena tanaman mati keracunan, dan ***Persen hasil = (Y_{perlakuan}/Y₀) X 100%.

meningkat sebesar 42,31%, meningkatkan serapan N, P, dan K tanaman, serta hasil biomas kering jagung. Perlakuan Na⁺ meningkatkan serapan K tanaman tapi tidak berpengaruh terhadap hasil biomas kering. Perlakuan Fe³⁺ meningkatkan serapan N, P, dan K tanaman sehingga hasil biomas kering pun meningkat. Perlakuan Demikian pula pada Endoaquert Tipik, asam oksalat meningkatkan ketersediaan K sehingga menurunkan kebutuhan pupuk K, meningkatkan serapan N dan P tanaman, serta hasil biomas kering (11%). Perlakuan Na⁺ meningkatkan serapan K tanaman tapi tidak berpengaruh terhadap hasil biomas kering. Sementara itu Fe³⁺ meningkatkan serapan N dan K tanaman serta hasil biomas kering.

Pada tanah yang mengandung mineral liat smektit (Alfisol dan Vertisol), peningkatan efisiensi pemupukan K dan produksi tanaman melalui mekanisme pemanfaatan K tidak tersedia (K_{tda}) tanah menjadi K tersedia (K_{dd} dan K_i) tanah. Sementara itu pada tanah masam (Inceptisol, Ultisol, dan Oxisol), peningkatan efisiensi pemupukan (N dan K) melalui mekanisme pengurangan jumlah hara yang hilang akibat pencucian. Pemberian bahan organik berupa pupuk kandang sapi dapat meningkatkan efisiensi pupuk dan produksi ubi jalar di tanah Ultisol Kuamang Kuning, Jambi (Wigena *et al.*, 1993), sisa jerami padi dan jagung meningkatkan efisiensi pupuk dan hasil jagung di tanah Ultisol Sitiung, Sumatera Barat

(Nursyamsi *et al.*, 1996), serta pupuk kandang kotoran ayam dapat meningkatkan efisiensi pupuk dan hasil sayuran di tanah Inceptisol Ciherang, Bogor (Widowati *et al.*, 2009).

Uraian di atas menunjukkan bahwa peran utama asam oksalat (1000 ppm) terhadap pertumbuhan jagung adalah selain meningkatkan efisiensi pupuk K juga memperbaiki ketersediaan N, P, dan K tanah. Selain itu seperti halnya asam organik yang lainnya, asam oksalat juga dapat berperan sebagai zat perangsang tumbuh yang dapat meningkatkan pertumbuhan tanaman (Bolton *et al.*, 1993). Aplikasi asam oksalat di lapangan sesungguhnya dapat diganti dengan penggunaan tanaman yang banyak menghasilkan eksudat asam organik. Tanaman jagung dapat dipertimbangkan untuk dikembangkan di tanah-tanah yang didominasi smektit karena selain mempunyai nilai ekonomi tinggi juga akarnya dapat menghasilkan eksudat asam oksalat yang tinggi, yakni berkisar antara 0,45-0,85 mg/g BK/hari (Tabel 2).

Kation Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} dapat meningkatkan K_i dan K_{dd} tanah (Nursyamsi *et al.*, 2009). Dengan demikian maka ketiga kation tersebut berpotensi dalam meningkatkan ketersediaan K tanah sehingga mengurangi kebutuhan pupuk K atau meningkatkan efisiensi pupuk K. Selain itu Fe^{3+} takaran 125 ppm dapat meningkatkan serapan hara N, P, dan K tanaman sehingga produksi tanaman lebih baik. Demikian pula kation-kation tersebut dapat berperan sebagai hara makro (NH_4^+), mikro (Fe^{3+}), dan *beneficial nutrient* (Na^+) (Marschner, 1997). Aplikasi pupuk Na, NH_4 , dan Fe di lapangan harus mempertimbangkan sumber pupuk, dosis, dan waktu pemupukan. Selanjutnya perlu dipertimbangkan pula cara pemupukan yang murah, mudah, efektif, dan efisien.

Dengan demikian maka peningkatan efisiensi pupuk K di tanah-tanah yang didominasi smektit dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yakni perbaikan tanah dan penggunaan varietas tanaman yang tepat. Perbaikan tanah dilakukan melalui selain pengelolaan bahan organik dan pengelolaan hara N, P, K, juga penggunaan pupuk Na, NH_4 , dan Fe. Selanjutnya tanaman yang diusahakan selain bernilai ekonomi tinggi

juga yang dapat menghasilkan eksudat asam organik yang banyak.

KESIMPULAN

1. Salah satu aspek penting dalam upaya peningkatan efisiensi pemupukan K adalah pemanfaatan K yang terdapat dalam tanah sehingga dapat mengurangi kebutuhan pupuk K yang harus ditambahkan. 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.
2. Teknologi penggunaan tanaman yang akarnya banyak mengeluarkan eksudat asam organik dan pupuk yang mengandung kation NH_4^+ , Na^+ , dan Fe^{3+} merupakan teknologi yang sesuai dan efektif meningkatkan efisiensi penggunaan pupuk K untuk tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit.

DAFTAR PUSTAKA

- Bajwa, M.I. 1987. Comparative ammonium and potassium fixation by some wetland rice soil clays as affected by mineralogical composition and treatment sequence. Potash Review No. 1/1987. International Potash Institute, Switzerland.
- Bolton, H.Jr., J.K. Fredrickson, and L.F. Elliot. 1993. Microbial ecology of the rhizosphere. Pp 27-64. *In* Soil Microbial Ecology. Applications in Agricultural and Environmental Management. Marcel Dekker, Inc. 270 Madison Avenue, New York.
- Borchardt, G. 1989. Smectites. Pp 675-727. *In* Minerals in Soil Environments. Second Edition. Soil Science Society of America Madison, Wisconsin, USA.
- Brady, N.C. 1984. The Nature and Properties of Soils. Ninth Edition. Macmillan Publishing Company, New York.
- Dierolf, T, T. Fairhurst, and E. Mutert. 2001. Soil Fertility Kit: A Toolkit for Acid, Upland Soil Fertility Management in

- Southeast Asia. Potash and Phosphate Institute/Potash and Phosphate Institute of Canada (PPI/PPIC) (www.eseap.org).
- Dhillon, S.K. and K.S. Dhillon. 1992. Kinetics of release of potassium by sodium tetraphenyl boron from some topsoil samples of Red (Alfisols), Black (Vertisols), and Alluvial (Inceptisols and Entisols) soils of India. *Fertilizer News* 32(2):135-138.
- Douglas, L.A. 1989. Vermiculites. Pp 635-674. *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.
- Geodert, W.J., R.B. Corey, and J.K. Syers. 1975. The effect of potassium equilibrium in soils of Rio Grande do Sul, Brazil. *Soil Sci.* 120:107-111.
- Ghousikar, C.P. and D.W. Kendre. 1987. Potassium supplying status of some soils of Vertisol 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.
- Ismail, I. 1997. The Role of Na and Partial Substitution of KCl by NaCl on Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) Growth and Yield, and Its Effect Towards Soil Chemical Properties. Disertasi Fakultas Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Kirkman, J.H., A. Basker, A. Surapaneni, and A.N. Macgregor. 1994. Potassium in the soils of New Zealand- a review. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 37:207-227.
- Marschner, H. 1997. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Second Edition. Academic Press, Harcourt Brace & Company, Publisher. Tokyo.
- Murthy, A.S.P., S.K.N. Nath, and D.P. Viswanath. 1987. Mineralogy and chemistry of potassium in Vertisols of India. *Potash Review* No. 6/1987. International Potash Institute, Switzerland.
- Nursyamsi, D., Sholeh, J.S. Adiningsih, dan A. Adi. 1996. Penggunaan bahan organik untuk meningkatkan efisiensi pupuk N dan produktivitas tanah Ultisol di Sitiung, Sumbar. *Jurnal Tanah Tropika* 2:26-33.
- Nursyamsi, D., M. Osaki, and T. Tadano. 2002. Mechanism of aluminum toxicity avoidance in tropical rice (*Oryza sativa*), maize (*Zea mays*), and soybean (*Glycine max*). *Indonesian Journal of Agricultural Science* 5(1):12-24.
- Nursyamsi, D. M.T. Sutriadi, dan U. Kurnia. 2004. Penentuan kebutuhan pupuk kalium untuk kedelai (*Glycine max* L.) pada Typic Kandiodox berdasarkan prosedur uji tanah. *Jurnal Tanah Tropika* 10 (1): 1-10.
- Nursyamsi, D., Husnain, A. Kasno, dan D. Setyorini. 2005. Tanggapan tanaman jagung (*Zea mays*) terhadap pemupukan MOP Rusia pada Inceptisol dan Ultisol *Jurnal Tanah dan Iklim* 23:13-23.
- Nursyamsi, D. dan M.T. Sutriadi. 2005. Uji tanah hara kalium di tanah Inceptisol untuk kedelai. *Agric, Jurnal Ilmu Pertanian* 18(1):102-118.
- Nursyamsi, D. dan M.T. Sutriadi. 2006. Kalibrasi uji kalium tanah Vertisol untuk kedelai. *Jurnal Wacana Pertanian* V(1):33-40.
- Nursyamsi, D. 2006. Kebutuhan pupuk kalium tanah Ultisol untuk kedelai. *Jurnal Tanah dan Lingkungan*.

- Nursyamsi, 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.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan. 2008a. Pengaruh asam oksalat, Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap ketersediaan K pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. *Jurnal Tanah Tropika* 14(1):33-40.
- Nursyamsi, D., K. Idris, S. Sabiham, D.A. Rachim, dan A. Sofyan. 2008b. Pengaruh asam oksalat, Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap ketersediaan K tanah, serapan N, P, dan K tanaman, serta produksi jagung pada tanah-tanah yang didominasi smektit. *Jurnal Tanah dan Iklim* 28:69-82.
- 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, Na^+ , NH_4^+ , and 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, and A. Sofyan. 2009. Jerapan dan pengaruh Na^+ , NH_4^+ , dan Fe^{3+} terhadap ketersediaan K pada tanah-tanah yang didominasi mineral liat smektit. *Jurnal Tanah Tropika* V(14)1:25-31.
- Nursyamsi, D. 2009. Effect of potassium and maize varieties on organic acid exudate from roots plant N, P, and K uptakes and plant dry weight of maize (*Zea mays*, L.). *Indonesian Journal of Agronomy* 37(2):107-114.
- Nursyamsi, D. 2010. Identification of nutrients deficiencies at calcareous soils for maize. *Journal of Tropical Soils* 15(3):203-212.
- Nursyamsi, D. 2011. Mekanisme pelepasan K terfiksasi menjadi tersedia bagi pertumbuhan tanaman pada tanah-tanah yang didominasi smektit. *Jurnal Sumberdaya Lahan* 5(2):61-74.
- 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 and K. Mengel. 2000. Potassium release from mineral structures by H^+ ion resin. *Geoderma* 96:291-305.
- Sidhu, P.S. 1987. Mineralogy of potassium in soils of Punjab, Haryana, Mimachal Pradesh and Jammu and Kashmir. *Potash Review* No. 6/1987. International Potash Institute, Switzerland.
- Sittibusaya, C., W. Nop-Amornbodee, C. Narkviroj, M. Donse, C.Torpone, and M. Manmoh. 1978. Response to potassium fertilizer of cassava grown on Yasothon and Korat Soils. Pp. 374-383. *In* 1978 Res. Rep. (no. 1), Soils and Fertilizer Branch, Field Crop Division, Dept Agri., Thailand (in Thai).
- Sofyan, A., D. Nursyamsi, and L.I. Amien. 2003. Development of soil testing program in Indonesia. Workshop Proceedings. Field Testing of the Integrated Nutrient Management Support System (NuMaSS) in Southeast Asia. 21-24 January 2002, Philippines.
- 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.
- Sulaeman, Eviati, S. Atikah, dan J.S. Adiningsih. 2000. Hubungan kuantitas dan intensitas kalium untuk menduga kemampuan tanah dalam persediaan hara kalium. Hlm 125-140. *Dalam* Prosiding Seminar Nasional Reorientasi

- Pendayagunaan Sumberdaya Tanah, Iklim, dan Pupuk. Cipayung-Bogor, 31 Oktober-2 Nopember 2000.
- Syarif, A.A. 2005. Ketenggangan Genotipe Padi terhadap Defisiensi Hara Fosfor. Disertasi Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.
- Tan, K.H. 1978. Effects of humic and fulvic acids on release of fixed potassium. *Geoderma* 21:67-74.
- Tan, K.H. 1998. Principles of Soil Chemistry. Third Edition Revised and Expanded. Marcel Dekker, Inc., New York.
- Widowati, L.R. 2009. Peranan pupuk organik terhadap efisiensi pemupukan dan tingkat kebutuhannya untuk tanaman sayuran pada tanah Inceptisol, Ciherang, Bogor. *Jurnal Tanah Tropika* 14(3):221-228.
- Wigena, I G.P., J. Purnomo, dan J. Prawirasumantri. 1993. Peranan bahan organik, pupuk N, dan K terhadap produksi ubi jalar pada tanah Podsolik. Hlm 65-74 *Dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bidang Kesuburan dan Produktivitas Tanah. Bogor, 12-21 Februari 1993. Puslibangtanak, Bogor.
- Zhu Yong-Guan and Luo Jia-Xian. 1993. Release of non-exchangeable soil K by organic acids. *Pedosphere* 3:269-276.