

# Inaktivasi *In Situ* Pencemaran Kadmium pada Tanah Pertanian Menggunakan Amelioran dan Pupuk pada Dosis Rasional untuk Budidaya Tanaman

Untung Sudadi<sup>1</sup>, Supiandi Sabiham<sup>1</sup>, Atang Sutandi<sup>1</sup> dan Muchammad Sri Saeni<sup>2</sup>

Makalah diterima 10 Juni 2008 /disetujui 7 Juli 2008

## ABSTRACT

**In Situ Inactivation of Cadmium Pollution in an Arable Soil Using Ameliorants and Fertilizers at Rationale Dosage for Crop Cultivation (Sudadi U., S. Sabiham, A. Sutandi, and M.S. Saeni):** Arable soils located in the vicinity of urban and industrial area are considered vulnerable to heavy metals pollution. Chemical inactivation, an in situ remediation method that used inexpensive chemicals to reduce pollutant solubility in polluted soil, was examined on a Cd-spiked arable soil. The study was aimed to investigate the effectiveness of ameliorants and fertilizers normally recommended for crop cultivation, using tomato as the test plant, from the point of view to reduce soil Cd extractability and plant Cd concentration. A 100-day greenhouse experiment in a completely randomized design consisting of three rates of rationale dosage of ameliorants and fertilizers (RDAF) [0, 50, 100%] and four levels of soil Cd spike [0, 10, 20, 40 mg Cd kg<sup>-1</sup> soil, using 3 CdSO<sub>4</sub>.8H<sub>2</sub>O] in triplicate was conducted. The 100% rate of RDAF applied was: 4 ton dolomite ha<sup>-1</sup>, 30 ton cow dung ha<sup>-1</sup>, 150 kg N ha<sup>-1</sup> (½ Urea + ½ Ammonium Sulfate), 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> (SP-36) and 100 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> (KCl). Significant reductions in soil extractable Cd ( $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ ) [from 13.35 to 8.77 mg kg<sup>-1</sup>, 34%] and plant shoots-Cd ( $Cd_{ps}$ ) [from 8.66 to 5.46 µg g<sup>-1</sup>, 37%] were measured at 100% RDAF treatment as compared to the control soil, indicating the occurrence of an in situ soil Cd inactivation and plant element selective-uptake phenomenon. Multiple regression analysis that incorporating all 36 data pairs resulted in the following equations: (1)  $soil\ Cd_{NH_4OAc-EDTA} = -0.18\ pH_{H_2O} + 0.21\ P_{Bray\#1} + 0.51\ organic-C - 0.57\ exch.-Mg + 0.65\ Cd_{aqua\ regia}$  ( $R^2 = 0.76$ ), and (2)  $Cd_{ps} = 0.08\ N_{ps} - 0.17\ K_{ps} - 0.19\ Mg_{ps} - 0.24\ P_{ps} + 0.27\ S_{ps} - 0.41\ Ca_{ps}$  ( $R^2 = 0.54$ , 3 outliers removed). These results suggest that a proper amelioration and fertilization program may be prospective to be recommended as a low-cost Cd pollution remediation strategy for arable soils.

**Keywords:** Ameliorants, arable soil, cadmium, fertilizers, in situ inactivation

## PENDAHULUAN

Kadmium (Cd) merupakan logam berat pencemar lingkungan yang tidak memiliki fungsi hayati dan bersifat sangat toksik bagi tumbuhan dan hewan (Kabata-Pendias dan Pendias, 2001). Fitotoksisitas Cd dapat menyebabkan klorosis, nekrosis, layu serta gangguan fotosintesis dan transpirasi sehingga menghambat pertumbuhan (Maier *et al.*, 2003; Smeets *et al.*, 2005). Namun, Cd dapat terakumulasi dalam kadar yang tinggi pada bagian tanaman yang dapat dikonsumsi tanpa menimbulkan gejala cekaman, sehingga lebih berisiko

bagi kesehatan manusia. Pada manusia, akumulasi kronis dalam ginjal melebihi 200 mg Cd kg<sup>-1</sup> dapat menyebabkan disfungsi ginjal, kerapuhan dan deformasi tulang, serta kanker paru (Nawrot *et al.*, 2006; Staessen *et al.*, 1999).

Dampak lingkungan dari pencemaran Cd berkaitan dengan reaktivitas, kelarutan dan mobilitasnya. Distribusi Cd pada fase padatan dan larutan tanah, yang menentukan kelarutannya, diatur oleh proses-proses sorpsi (erapan) pada permukaan fase padatan, meliputi pengkompleksan permukaan, pertukaran ion, serta proses-proses pengikatan dan pembentukan presipitat dengan komponen tanah

<sup>1</sup>Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Jalan Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680. Tel: 0251-422371, Fax: 0251-422328, e-mail: untungsudadi@yahoo.com

<sup>2</sup>Departemen Kimia, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Pertanian Bogor, Jalan Meranti, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680.

*J. Tanah Trop.*, Vol. 13, No. 3, 2008: 171-178

ISSN 0852-257X

(Holm *et al.*, 2003). Variasi kelarutan Cd tanah berkorelasi erat dengan nilai pH, kapasitas tukar kation (KTK), kadar bahan organik dan liat, serta keberadaan ion logam lainnya (Sauvé *et al.*, 2000).

Selain tanah di kawasan industri metalurgi, tanah pertanian di sekitar kawasan perkotaan dan industri lainnya juga rentan terhadap pencemaran Cd, yang antara lain bersumber dari deposisi atmosferik sisa pembakaran bahan bakar fosil, insinerasi plastik dan aki bekas, serta pemanfaatan *biosolid*, pupuk dan pestisida yang mengandung Cd (Alloway, 1995a). Metode remediasi yang diterapkan pada tanah tercemar logam berat umumnya berbasis teknik kimia dan rekayasa sipil, diantaranya teknik *soil washing, ashing, and replacement* (Hong *et al.*, 2002; Tokunaga dan Hakuta, 2002) serta teknik elektrokinetik (Virikutyte *et al.*, 2002). Teknik-teknik ini bersifat *ex situ* karena memerlukan ekskavasi lapisan tanah yang tercemar sehingga mahal.

Salah satu metode alternatif yang murah tetapi tetap efektif dan dapat diterapkan pada tanah pertanian adalah teknik inaktivasi *in situ*. Teknik ini merujuk pada penggunaan bahan-bahan penyehat tanah (*soil amendments*) yang memiliki kapasitas sorpsi yang tinggi terhadap kation logam berat (Vangronsveld dan Cunningham, 1998). Melalui mekanisme sorpsi, aplikasi bahan-bahan tersebut akan mengubah kation logam berat pencemar yang sebelumnya berada dalam bentuk mudah larut menjadi bentuk yang secara geokimia lebih stabil, sehingga menurunkan mobilitas dan toksisitasnya (Adriano *et al.*, 2004). Proses desorpsi mungkin terjadi, namun dibutuhkan energi aktivasi yang jauh lebih besar daripada untuk sorpsi, sehingga laju desorpsi pada suhu tanah yang normal akan jauh lebih lambat daripada laju sorpsi (McBride, 1989).

Berbagai bahan telah diteliti efektivitasnya untuk menginaktivasi Cd secara *in situ* pada tanah-tanah tercemar berat di kawasan industri metalurgi, antara lain mineral monmorilonit (Badora *et al.*, 1998), hidroksiapatit (Boisson *et al.*, 1999), zeolit (Oste *et al.*, 2002), bentonit dan oksida Mn (Cheng dan Hseu, 2002), batuan fosfat alam dan kapur (Basta *et al.*, 2001; Brown *et al.*, 2005), pupuk asam fosfat ( $H_3PO_4$ ), *diammonium phosphate* (DAP) dan *triple superphosphate* (TSP) (Brown *et al.*, 2004, 2007), serta bahan organik dalam bentuk *biosolid* (Calace *et al.*, 2005; Hettiarachchi *et al.*, 2003). Namun, karena tingkat pencemaran yang diremediasi sangat tinggi maka dosis bahan yang dicobakan juga sangat tinggi, sehingga tidak rasional untuk diaplikasikan pada

tanah pertanian. Misalnya, diperlukan dosis efektif 2,300 mg P  $kg^{-1}$  setara 4.6 ton P  $ha^{-1}$  untuk meremediasi pencemaran pada tingkat 1,090 mg Cd  $kg^{-1}$  tanah (McGowen, 2001).

Menurut Kabata-Pendias dan Pendias (2001), salah satu mekanisme toleransi tanaman terhadap pencemaran logam berat adalah melalui selektivitas serapan ion. Dari segi budidaya tanaman, keberhasilan upaya remediasi pencemaran logam berat dapat didasarkan pada terjadinya penurunan kadarnya dalam jaringan tanaman. Hal ini berkaitan dengan tiga hal, yaitu: (i) akibat penurunan kadar fraksi aktif logam berat dalam tanah, atau (ii) peningkatan selektivitas tanaman dalam menyerap ion dari media tumbuh, atau (iii) kombinasi keduanya (Alloway, 1995b).

Berdasarkan latar belakang di atas, telah dilakukan percobaan rumahkaca dengan tujuan mengevaluasi efektivitas tindakan inaktivasi pencemaran Cd secara *in situ* pada tanah pertanian menggunakan amelioran dan pupuk pada tingkat dosis yang rasional untuk budidaya tanaman dari segi penurunan kadar fraksi yang mudah diserap tanaman atau fraksi aktif Cd dalam tanah dan kadar Cd dalam jaringan tanaman.

## BAHAN DAN METODE

### Bahan Tanah, Tanaman, Amelioran dan Pupuk

Contoh tanah komposit Aluvial Coklat Kekuningan (*Fluventic Eutrudept*) berbahan induk aluvium dari napal, batukapur dan batuliat (Lembaga Penelitian Tanah, 1979) diambil pada lapisan 0-20 cm di lahan pertanian di kawasan industri Cileungsi (Desa Gunung Putri, Kecamatan Gunung Putri, Kabupaten Bogor). Beberapa sifat fisika dan kimia tanah awal menurut kriteria Landon (1984) adalah sebagai berikut: tekstur tergolong liat [pasir 9,03%, debu 38,52%, liat 52,45%],  $pH_{H_2O}$  (1:1) agak masam [6,30],  $C_{organik}$  rendah [2,37%],  $N_{Kjeldahl}$  sangat rendah [0,09%],  $P_{Bray\#1}$  rendah [11,82 mg  $kg^{-1}$ ], basa-basa K-, Ca- dan Mg-dapat dipertukarkan ( $K_{dd}$ ,  $Ca_{dd}$  dan  $Mg_{dd}$ ) ketiganya tergolong sedang [0,20; 3,87 dan 0.65  $cmol_c kg^{-1}$ ] dan KTK rendah [9,53  $cmol_c kg^{-1}$ ]. Kadar Cd<sub>aqua</sub> [2,54 mg Cd  $kg^{-1}$ ] menurut prosedur Lacatusu (2000) menunjukkan tingkat pencemaran ringan dengan nilai indeks c/p 2,97. Tanaman uji yang digunakan adalah tomat dataran rendah (*Lycopersicon esculentum* M.) varietas Mutiara. Benih diperoleh dari Balai Penelitian Tanaman dan Sayuran (Balitsa),

Lembang. Untuk perlakuan ameliorasi dan pemupukan digunakan dolomit ( $\text{CaMgCO}_3$ ), pupuk kandang kotoran (pukan) sapi, Urea, ZA, SP-36 dan KCl, sedangkan untuk pengkayaan kadar Cd tanah digunakan  $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$  (*p.a.* Merck). Pupuk SP-36 yang digunakan mengandung  $3.7 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ , sedangkan kadar Cd dalam bahan lainnya tidak terukur.

### **Pelaksanaan Percobaan Rumahkaca**

Percobaan dilaksanakan di rumahkaca Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB pada Maret sampai Juli 2005 menurut Rancangan Acak Lengkap dengan dua faktor, yaitu 3 taraf perlakuan ameliorasi dan pemupukan [0, 50 dan 100% dosis rasional amelioran dan pupuk] dan empat taraf perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah [0, 10, 20 dan  $40 \text{ mg Cd kg}^{-1}$ ] dengan 3 ulangan. Dosis rasional amelioran dan pupuk (DRAP) pada taraf 100%, didasarkan pada rekomendasi hasil penelitian Balitsa Lembang untuk budidaya tomat dataran rendah (Nurtika, 1992; Nurtika dan Sumarna, 1992; Nurtika dan Sumarni, 1992; Nurtika dan Suwandi, 1992; Sahat, 1989), yang diaplikasikan adalah: 4 ton dolomit  $\text{ha}^{-1}$ , 30 ton pukan sapi  $\text{ha}^{-1}$ ,  $150 \text{ kg N ha}^{-1}$  ( $\frac{1}{2}$  Urea +  $\frac{1}{2}$  ZA),  $150 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$  (SP-36) dan  $100 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$  (KCl).

Pada hari pertama, tanah setara 5 kg Berat Kering Mutlak  $105^\circ\text{C}$  (BKM) dicampur merata dengan dolomit, pukan sapi dan larutan Cd sesuai taraf perlakuan berdasarkan BKM tanah, kemudian dipindahkan ke polybag, dimasukkan ke pot dan diinkubasikan selama 4 minggu. Selanjutnya pupuk P serta  $\frac{1}{2}$  dosis pupuk N dan K diaplikasikan sesuai taraf perlakuan berdasarkan populasi tanaman [ $40.000 \text{ tanaman ha}^{-1}$ ], kemudian tanah diinkubasikan lagi selama dua hari dan satu bibit tomat umur semai 3 minggu ditanam ke setiap pot. Pada umur 30 hari setelah tanam (HST),  $\frac{1}{2}$  dosis pupuk N dan K sisanya diaplikasikan sesuai taraf perlakuan. Selama percobaan, kadar air tanah dipertahankan mendekati kapasitas lapang dengan menambahkan kekurangan air menggunakan *aquadest* dengan cara penimbangan.

Pada umur 100 HST dilakukan pemotongan tajuk (batang dan daun) tanaman uji pada posisi 1 cm di atas permukaan tanah dan pangkal tajuk tanaman dibersihkan menggunakan *aquadest*. Contoh tanaman dioven [ $60^\circ\text{C}$ ] hingga bobotnya konstan, dicatat sebagai bobot kering tajuk ( $\text{BK}_{\text{tt}}$ ) dan selanjutnya

dihaluskan untuk bahan analisis jaringan tanaman. Tanah dikeringudarkan, dihaluskan dan disaring menggunakan saringan *nylon* berdiameter 0,5 mm untuk bahan analisis tanah.

### **Analisis Tanah dan Jaringan Tanaman**

Analisis tanah dilakukan terhadap  $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$  (1:1, pH-meter),  $\text{C}_{\text{organik}}$  (Walkley dan Black),  $\text{N}_{\text{Kjeldahl}}$ ,  $\text{P}_{\text{Bray}\#1}$ ,  $\text{K}_{\text{dd}}$ ,  $\text{Ca}_{\text{dd}}$ ,  $\text{Mg}_{\text{dd}}$  dan KTK ( $\text{N NH}_4\text{OAc pH 7.0}$ ), fraksi aktif Cd ( $\text{Cd}_{\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}}$ ) menggunakan pengekstrak  $0,5 \text{ M NH}_4\text{OAc} + 0,02 \text{ M EDTA pH 4,65}$  (Larkanen dan Erviö, 1971 dalam Kiekens, 1995) dan kadar *pseudo* total Cd ( $\text{Cd}_{\text{aqua regia}}$ ) menggunakan pengekstrak aqua regia (7,5:2,5, v/v, HCl:HNO<sub>3</sub>) (Ure, 1995). Kadar Cd terekstrak diukur dengan *atomic absorption spectrophotometer* (AAS, Perkin Elmer 1100 B). Analisis kadar unsur dalam tajuk tanaman uji dilakukan terhadap Cd ( $\text{Cd}_{\text{tt}}$ ), P ( $\text{P}_{\text{tt}}$ ), K ( $\text{K}_{\text{tt}}$ ), Ca ( $\text{Ca}_{\text{tt}}$ ) dan Mg ( $\text{Mg}_{\text{tt}}$ ) menggunakan pengekstrak  $0,2 \text{ M HNO}_3$ , N ( $\text{N}_{\text{tt}}$ ) menggunakan metode Kjeldahl dan S ( $\text{S}_{\text{tt}}$ ) menggunakan pengekstrak  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 + \text{HCl}$ . Kadar  $\text{Cd}_{\text{tt}}$ ,  $\text{Ca}_{\text{tt}}$  dan  $\text{Mg}_{\text{tt}}$  diukur dengan AAS;  $\text{P}_{\text{tt}}$  dan  $\text{S}_{\text{tt}}$  dengan *spectrophotometer* dan  $\text{K}_{\text{tt}}$  dengan *flamephotometer*.

### **Analisis Data**

Pengaruh perlakuan dievaluasi berdasarkan analisis ragam dan uji berganda Duncan (*Duncan Multiple Range Test, DMRT*) menggunakan perangkat lunak SPSS versi 13.5 terhadap parameter tanah dan tanaman. Analisis regresi linier berganda juga dilakukan untuk mengevaluasi hubungan dan pertautan antar parameter tanah dan tanaman.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

### **Pengaruh Aplikasi Teknik Inaktivasi *In Situ* terhadap $\text{Cd}_{\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}}$ dan $\text{Cd}_{\text{tt}}$**

Tabel 1 menunjukkan bahwa perlakuan ameliorasi dan pemupukan sebagai aplikasi teknik inaktivasi *in situ* berpengaruh sangat nyata ( $p < 0,01$ ) terhadap kadar  $\text{Cd}_{\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}}$  dan  $\text{Cd}_{\text{tt}}$ , serta berpengaruh nyata ( $p < 0,05$ ) terhadap  $\text{BK}_{\text{tt}}$ . Perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah berpengaruh sangat nyata terhadap  $\text{Cd}_{\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}}$  dan  $\text{Cd}_{\text{tt}}$ , tetapi berpengaruh tidak nyata terhadap  $\text{BK}_{\text{tt}}$ . Pengaruh interaksi kedua perlakuan terhadap ketiga parameter tersebut tidak nyata.

U. Sudadi et al.: Inaktivasi *In Situ* Pencemaran Kadmium pada Tanah Pertanian

Tabel 1. Pengaruh inaktivasi *in situ* dari ameliorasi dan pemupukan pada taraf 0, 50 dan 100% dosis rasional amelioran dan pupuk (DRAP) untuk budidaya tanaman uji tomat serta perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah terhadap kadar  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  tanah, bobot kering tajuk (BK<sub>tt</sub>) dan kadar Cd tajuk (Cd<sub>tt</sub>)

Ameliorasi dan Pemupukan % DRAP #	Perlakuan Cd (mg kg <sup>-1</sup> )				
	0	10	20	40	Rataan †
	Kadar $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ tanah mg kg <sup>-1</sup>				
0	0,53 ##	8,34	19,85	24,67	13,35 a
50	0,80	9,42	20,22	27,73	14,54 a
100	0,41	5,16	10,13	19,36	8,77 b
Rataan †	0,58D	7,64C	16,73B	23,92A	
	Bobot kering tajuk tomat (BK <sub>tt</sub> ) g pot <sup>-1</sup>				
0	9,25	9,13	12,27	9,83	10,12 c
50	38,88	38,02	41,50	40,83	39,81 a
100	38,62	33,86	24,19	21,38	29,51 b
Rataan	28,92A	27,01A	25,99A	24,01A	
	Kadar Cd tajuk tomat (Cd <sub>tt</sub> ) µg g <sup>-1</sup>				
0	6,00	7,00	9,00	12,66	8,66 a
50	5,00	5,50	8,00	9,66	7,04 ab
100	1,00	4,93	7,00	9,49	5,46 b
Rataan	4,00C	5,61BC	8,00AB	10,60A	

Keterangan: # 100% DRAP (dosis rasional amelioran dan pupuk) untuk budidaya tomat komersial di lahan kering dataran rendah: 4 ton ha<sup>-1</sup> dolomit, 30 ton ha<sup>-1</sup> pukan sapi, 150 kg ha<sup>-1</sup> N (½ Urea + ½ ZA), 150 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (SP-36) dan 100 kg ha<sup>-1</sup> K<sub>2</sub>O (KCl) (Nurtika. 1992; Nurtika dan Sumarna. 1992; Nurtika dan Sumarni. 1992; Nurtika dan Suwandi. 1992; Sahat. 1989).  
## Rataan dari 3 ulangan  
† Angka yang diikuti oleh huruf yang sama dalam kolom atau baris tidak berbeda nyata pada taraf α= 0,05 (DMRT)

Pada taraf 100% DRAP terukur penurunan yang sangat nyata pada kadar  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  [dari 13,35 menjadi 8,77 mg kg<sup>-1</sup>, 34%] dan Cd<sub>tt</sub> [dari 8,66 menjadi 5,46 µg g<sup>-1</sup>, 37%] dibandingkan kontrol (0% DRAP). Hal ini mengindikasikan terjadinya efek inaktivasi *in situ* terhadap fraksi aktif Cd tanah terkait dengan meningkatnya pH [dari 6,5 menjadi 7,5], C<sub>organik</sub> [dari 0,97 menjadi 2,09%] dan KTK [dari 12,32 menjadi 14,29 cmol<sub>c</sub> kg<sup>-1</sup>] tanah, yang menyebabkan meningkatnya jumlah tapak dan kapasitas sorpsi terhadap Cd pada fase padatan tanah (Alloway, 1995c; Holm et al., 2003; Sauvé et al., 2000), terutama sebagai akibat dari ameliorasi dolomit dan pukan sapi.

Dalam penelitian ini, perlakuan pemupukan N, P dan K secara simultan diduga turut berperan dalam menginaktivasi Cd tanah meskipun peranannya relatif rendah jika dibandingkan dengan dolomit dan pukan sapi. Hal ini terkait dengan dosis yang digunakan, yaitu 150 kg N, 150 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dan 100 kg K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> pada taraf 100% DRAP. Pemupukan amonium sulfat atau ZA setara 200 kg N ha<sup>-1</sup> pada tanah tercemar 2.4 mg total Cd kg<sup>-1</sup> bahkan dilaporkan meningkatkan 2 kali lipat kadar Cd larutan tanah di zona perakaran, tetapi pada zona 2 mm dari permukaan akar pengaruhnya lebih rendah (Schremmer et al., 1999 dalam Schmidt, 2003). Dari percobaan pencucian kolom tanah, perlakuan 460 mg P kg<sup>-1</sup> tanah setara

920 kg P ha<sup>-1</sup> dalam bentuk DAP dilaporkan menurunkan 52% kadar Cd [dari 14,9 menjadi 7,1 mg Cd kg<sup>-1</sup>] dalam efluen melalui terbentuknya resipitat Cd-fosfat tak-larut (McGowen, 2001). Haghiri (1976) melaporkan penurunan kadar Cd tanah dan Cd dalam tajuk kedelai (*Glycine max* L. Merr.) dengan meningkatnya persentase kejenuhan K tanah.

Namun, BK<sub>tt</sub> tertinggi terukur pada perlakuan 50% DRAP yang mengindikasikan terjadinya ketidakseimbangan kadar atau serapan hara pada dosis ameliorasi dan pemupukan yang lebih tinggi karena dosis maksimum telah terlampaui. Pada perlakuan 50% DRAP, nisbah kadar N:S:P pada tajuk tanaman uji adalah 0,88:0,64:1,00 dan untuk K:Ca:Mg adalah 1,43:2,79:0,51. Pada perlakuan 100% DRAP, nisbah N:S:P menjadi 0,99:0,59:1,00 dan untuk K:Ca:Mg

menjadi 1,53:3,55:0,64. Menurut Altunaga (1988), kondisi yang optimum untuk tomat adalah 9,67:6,00:1,00 untuk N:S:P dan 1,34:1,10:1,00 untuk K:Ca:Mg.

**Hubungan antara Cd<sub>NH4OAc-EDTA</sub> dengan Cd<sub>aqua regia</sub>, pH<sub>H2O</sub>, C<sub>organik</sub>, N<sub>Kjeldahl</sub>, P<sub>Bray#1</sub>, Ca<sub>dd</sub>, Mg<sub>dd</sub>, K<sub>dd</sub> dan KTK tanah**

Gambar 1 menunjukkan bahwa penurunan Cd<sub>NH4OAc-EDTA</sub> akibat efek inaktivasi *in situ* dari perlakuan ameliorasi dan pemupukan seiring dengan penurunan Cd<sub>aqua regia</sub> serta peningkatan pH<sub>H2O</sub>, C<sub>organik</sub>, N<sub>Kjeldahl</sub>, P<sub>Bray#1</sub>, Ca<sub>dd</sub>, Mg<sub>dd</sub>, K<sub>dd</sub> dan KTK tanah, terutama pada taraf perlakuan pengkayaan Cd <20 mg kg<sup>-1</sup> tanah.

Gambar 1. Pengaruh inaktivasi *in situ* dari ameliorasi dan pemupukan pada taraf 0, 50 dan 100% dosis rasional amelioran dan pupuk (DRAP) untuk budidaya tanaman uji tomat serta perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah terhadap kadar Cd<sub>NH4OAc-EDTA</sub>, Cd<sub>aqua regia</sub>, pH<sub>H2O</sub>, C<sub>organik</sub>, N<sub>Kjeldahl</sub>, P<sub>Bray#1</sub>, Ca<sub>dd</sub>, Mg<sub>dd</sub>, K<sub>dd</sub> dan KTK tanah.

**U. Sudadi et al.: Inaktivasi In Situ Pencemaran Kadmium pada Tanah Pertanian**

Namun, berdasarkan hasil analisis regresi linier berganda antara  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  sebagai peubah tak-bebas dengan  $Cd_{aqua\ regia}$ ,  $pH_{H_2O}$ ,  $C_{organik}$ ,  $N_{Kjeldahl}$ ,  $P_{Bray\#1}$ ,  $Ca_{dd}$ ,  $Mg_{dd}$ ,  $K_{dd}$  dan KTK tanah sebagai peubah bebas secara simultan diperoleh persamaan terbaik (*best-fit model*) sebagai berikut:

$$Cd_{NH_4OAc-EDTA} = -0,18 pH_{H_2O} + 0,21 P_{Bray\#1} + 0,51 C_{organik} - 0,57 Mg_{dd} + 0,65 Cd_{aqua\ regia} \quad [1]$$

$(R^2 = 0,76; n = 36)$

Dengan memasukkan peubah  $Ca_{dd}$  ke dalam model diperoleh koefisien determinasi ( $R^2$ ) yang lebih tinggi, tetapi terjadi multikolinieritas antar  $Ca_{dd}$  dengan  $Mg_{dd}$ , sehingga persamaan [1] yang dipilih. Persamaan [1] menunjukkan bahwa peningkatan kadar  $Mg_{dd}$  dan  $pH_{H_2O}$  menurunkan  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ , sedangkan peningkatan  $Cd_{aqua\ regia}$ ,  $C_{organik}$  dan  $P_{Bray\#1}$

meningkatkan  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ . Hal pertama mengindikasikan efektivitas perlakuan ameliorasi, terutama dari dolomit, dalam meningkatkan jumlah dan kapasitas sorpsi terhadap Cd pada fase padatan tanah seperti yang diharapkan dari penerapan teknik inaktivasi *in situ*. Hal kedua terkait dengan pengkayaan kadar Cd tanah menggunakan garam  $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$  yang bersifat mudah larut, adanya kandungan Cd pada pupuk SP-36 yang digunakan [3.7 mg Cd  $kg^{-1}$  pupuk] serta terbentuknya kompleks Cd-organik yang larut akibat ameliorasi pukan sapi hingga 30 ton  $ha^{-1}$  sehingga terekstrak dan terukur sebagai  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ . Seperti yang dilaporkan oleh Naidu dan Harter (1998), pada  $pH > 5,5$  hanya Cd dalam bentuk kompleks organik yang terlarut ke larutan tanah. Menurut Sauvé *et al.* (2000), pada tanah tercemar, kadar fraksi Cd-organik yang terlarut dapat melebihi kadar fraksi Cd dalam bentuk ion bebas.

Gambar 2. Pengaruh inaktivasi *in situ* dari ameliorasi dan pemupukan pada taraf 0, 50, dan 100% dosis rasional amelioran dan pupuk (DRAP) untuk budidaya tanaman uji tomat serta perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah terhadap bobot kering tajuk serta kadar Cd, N, P, K, S, Ca dan Mg tajuk tomat.

### Hubungan antara $Cd_{tt}$ dengan $N_{tt}$ , $P_{tt}$ , $S_{tt}$ , $K_{tt}$ , $Ca_{tt}$ dan $Mg_{tt}$

Gambar 2 menunjukkan bahwa penurunan kadar  $Cd_{tt}$  akibat perlakuan ameliorasi dan pemupukan seiring dengan peningkatan kadar  $N_{tt}$ ,  $P_{tt}$ ,  $S_{tt}$ ,  $K_{tt}$ ,  $Ca_{tt}$  dan  $Mg_{tt}$ , terutama pada taraf perlakuan pengkayaan kadar Cd tanah yang rendah. Penurunan kadar  $Cd_{tt}$  pada perlakuan 50% DRAP lebih terkait dengan terjadinya efek pengenceran (*dillution effect*) akibat meningkatnya  $BK_{tt}$ .

Namun, pada taraf 100% DRAP, penurunan kadar  $Cd_{tt}$  seiring dengan menurunnya  $BK_{tt}$  dan  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$ . Hal ini lebih mengindikasikan terjadinya efek inaktivasi *in situ* Cd tanah dan selektivitas serapan ion oleh tanaman uji akibat perlakuan ameliorasi dan pemupukan daripada efek pengenceran. Berdasarkan analisis regresi linier berganda antara kadar  $Cd_{tt}$  sebagai peubah tak-bebas dengan kadar  $N_{tt}$ ,  $P_{tt}$ ,  $S_{tt}$ ,  $K_{tt}$ ,  $Ca_{tt}$  dan  $Mg_{tt}$  sebagai peubah bebas, dengan membuang 3 data pencilan, diperoleh persamaan berikut:

$$Cd_{tt} = 0,08 N_{tt} - 0,17 K_{tt} - 0,19 Mg_{tt} - 0,24 P_{tt} + 0,27 S_{tt} - 0,41 Ca_{tt}$$

( $R^2 = 0,54$ ;  $n = 33$ , 3 data pencilan dibuang) [2]

Persamaan [2] menunjukkan bahwa penurunan kadar  $Cd_{tt}$  terkait dengan peningkatan  $K_{tt}$ ,  $Mg_{tt}$ ,  $P_{tt}$  dan  $Ca_{tt}$  serta penurunan  $N_{tt}$  dan  $S_{tt}$ . Hal ini juga memberikan indikasi terjadinya selektivitas serapan ion sebagai salah satu mekanisme toleransi tanaman terhadap pencemaran logam berat (Kabata-Pendias dan Pendias, 2001). Sesuai dengan kriteria Alloway (1995b), kombinasi penurunan kadar  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  dan  $Cd_{tt}$  secara sangat nyata yang terukur dalam percobaan ini menunjukkan efektivitas dari perlakuan ameliorasi dan pemupukan pada dosis rasional untuk budidaya tanaman dalam menginaktivasi secara *in situ* pencemaran Cd pada tanah pertanian.

### KESIMPULAN

Ameliorasi dan pemupukan pada taraf 100% DRAP menurunkan secara sangat nyata kadar  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  dan  $Cd_{tt}$  masing-masing sebesar 34 dan 37% dibandingkan dengan kontrol. Penurunan  $Cd_{NH_4OAc-EDTA}$  berkaitan dengan peningkatan  $Mg_{dd}$  dan  $pH_{H_2O}$  serta penurunan  $Cd_{aqua\ regia}$ ,  $C_{organik}$  dan  $P_{Bray\#1}$  dan sebaliknya. Penurunan  $Cd_{tt}$  berkaitan dengan peningkatan  $Ca_{tt}$ ,  $P_{tt}$ ,  $Mg_{tt}$  dan  $K_{tt}$  serta penurunan  $S_{tt}$

dan  $N_{tt}$ , dan sebaliknya. Hasil ini menunjukkan efektivitas dan prospek penerapan tindakan ameliorasi dan pemupukan pada taraf dosis yang direkomendasikan untuk budidaya tanaman sebagai strategi remediasi pencemaran Cd yang murah pada tanah pertanian.

### DAFTAR PUSTAKA

- Adriano, D.C., W.W. Wenzel, J. Vangronsveld, N.S. Bolan. 2004. Role of assisted natural remediation in environmental cleanup. *Geoderma* 122(2-4): 121-142.
- Alloway, B.J. 1995a. The origin of heavy metals in soils. p.38-57. *In*: B.J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils*. 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Acad. Prof. London.
- Alloway, B.J. 1995b. Soil processes and the behaviour of heavy metals. p.11-37. *In*: B.J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils*. 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Acad. Prof. London.
- Alloway, B.J. 1995c. Cadmium. p.122-151. *In*: B.J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils*. 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Acad. Prof. London.
- Altunaga, C.H. 1988. Study of the mineral composition of plants by the systematic variant method. *Hort. Abstr.* 60: 5177.
- Badora, A., G. Furrer, A. Grunwald, and R. Schulin. 1998. Immobilization of zinc and cadmium in polluted soils by polynuclear A113 and Al-montmorillonite. *J. Soil Contamination* 7: 573-588.
- Basta, N.T., R. Gradwohl, K.L. Snethen, and J.L. Schroder. 2001. Chemical immobilization of lead, zinc, and cadmium in smelter-contaminated soils using biosolids and rock phosphate. *J. Environ. Qual.* 30: 1222-1230.
- Boisson, J., A. Ruttens, M. Mench, and J. Vangronsveld. 1999. Evaluation of hydroxiapatite as a metal immobilizing soil additive for the remediation of polluted soils. Part 1. Influence of hydroxiapatite on metal exchangeability in soil, plant growth and plant metal concentration. *Environ. Pollut.* 104(2): 225-233.
- Brown, S., R. Chaney, J. Hallfrisch, J.A. Ryan, and W.R. Berti. 2004. In situ treatments to reduce the phyto- and bioavailability of lead, zinc, and cadmium. *J. Environ. Qual.* 33: 522-531.
- Brown, S., B. Christensen, E. Lombi, M. McLaughlin, S. McGrath, J. Colpaert, and J. Vangronsveld. 2005. An inter-laboratory study to test the ability of amendments to reduce the availability of Cd, Pb, and Zn in situ. *Environ. Pollut.* 138(1): 34-45.
- Brown, S.L., H. Compton, and N.T. Basta. 2007. Field test of in situ soil amendments at the Tar Creek National Priorities List Superfund Site. *J. Environ. Qual.* 36: 1627-1634.
- Calace, N., T. Campisi, A. Lacondini, M. Leoni, B.M. Petronio, and M. Pietroletti. 2005. Metal-

- contaminated soil remediation by means of paper mill sludges addition: Chemical and ecotoxicological evaluation. *Environ. Pollut.* 136: 485-492.
- Cheng, S.F., and Z.Y. Hseu. 2002. In situ immobilization of cadmium and lead by different amendments in two contaminated soils. *Water Air Soil. Pollut.* 140(1-4): 73-84.
- Haghiri, F. 1976. Release of cadmium from clays and plant uptake of cadmium from soil as affected by potassium and calcium amendments. *J. Environ. Qual.* 5(4): 395-396.
- Hettiarachchi, G.H., J.A. Ryan, R.L. Chaney, and C.M. La Fleur. 2003. Sorption and desorption of cadmium by different fractions of biosolids-amended soils. *J. Environ. Qual.* 32: 1684-1693.
- Holm, P.E., H. Rootzen, O.K. Borggaard, J.P. Moberg, and T.H. Christensen. 2003. Correlation of cadmium distribution coefficients to soil characteristics. *J. Environ. Qual.* 32: 138-145.
- Hong, K.J., S. Tokunaga, and T. Kajinchi. 2002. Evaluation of remediation process with plant-derived biosurfactant for recovery of heavy metals from contaminated soils. *Chemosphere* 49: 379-387.
- Kabata-Pendias, A., and H. Pendias. 2001. Trace Elements in Soils and Plants. 3<sup>rd</sup> ed. CRC Press. Boca Raton. 413p.
- Kiekens, L. 1995. Zinc. p.284-305. *In: B.J. Alloway (ed.) Heavy Metals in Soils.* 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Acad. Prof. London.
- Lacatusu, R. 2000. Appraising levels of soil contamination with heavy metals. *Eur. Soil Bureau Res. Rep. No. 4.* Office Official Publ. Eur. Comm. Luxembourg.
- Landon, J.R. (ed.). 1984. Booker Tropical Soil Manual. A Handbook for Soil Survey and Agricultural Land Evaluation in the Tropics and Subtropics. Longman Inc. New York. 450p.
- Lembaga Penelitian Tanah. 1979. Peta Kesesuaian Wilayah untuk Tanaman Semusim Daerah Parung, Depok, Bogor. Ciawi Skala 1:50,000. Bogor.
- Maier, E.A., R.D. Matthews, J.A. McDowell, R.R. Walden, and B.A. Ahner. 2003. Environmental cadmium levels increase phytochelatin and glutathione in lettuce grown in a chelator-buffered nutrient solution. *J. Environ. Qual.* 32: 1356-1364.
- McBride, M.B. 1989. Reactions controlling heavy metal solubility in soils. *Adv. Soil Sci.* 10: 1-56.
- McGowen, S.L., N.T. Basta, and G.O. Brown. 2001. Use of Diammonium Phosphate to reduce heavy metals solubility and transport in smelter-contaminated soil. *J. Environ. Qual.* 30: 493-500.
- Naidu, R., and R.D. Harter. 1998. Effect of different organic ligands on cadmium sorption by and extractability from soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(3): 782-789.
- Nawrot, T., M. Plusquin, J. Hogervorst, H.A. Roels, H. Celis, L. Thijs, J. Vangronsveld, E.V. Hecke, and J.A. Staessen. 2006. Environmental exposure to cadmium and risk of cancer: A prospective population-based study. *Lancet Oncology* 7: 119-126.
- Nurtika, N. 1992. Pengaruh pupuk N, P, K dan sumber pupuk organik terhadap pertumbuhan dan hasil tomat kultivar Mutiara. *Bul. Penel. Hort.* 24(2): 112-117.
- Nurtika, N. dan A. Sumarna. 1992. Pengaruh pupuk kandang dan nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil tomat kultivar Berlian di tanah Latosol. *Bul. Penel. Hort.* 20(1): 74-80.
- Nurtika, N. dan N. Sumarni. 1992. Pengaruh sumber, dosis dan waktu aplikasi pupuk kalium terhadap pertumbuhan dan hasil tomat. *Bul. Penel. Hort.* 22(1): 96-101.
- Nurtika, N. dan Suwandi. 1992. Pengaruh pemberian kapur dan sumber pupuk nitrogen terhadap pertumbuhan dan hasil tomat. *Bul. Penel. Hort.* 22(4): 16-21.
- Oste, L.A., T.M. Lexmond, and W.V. Riemsdijk. 2002. Metal immobilization in soils using synthetic zeolites. *J. Environ. Qual.* 31: 813-821.
- Sahat, S. 1989. Bercocok tanam sayuran dataran rendah. Balai Penelitian Hortikultura. Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian. Lembang.
- Sauvé, S., W. Hendershot, and H.E. Allen. 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 34: 1125-1131.
- Schmidt, U. 2003. Enhancing phytoextraction: The effect of chemical soil manipulation on mobility, plant accumulation, and leaching of heavy metals. *J. Environ. Qual.* 32: 1939-1954.
- Smeets, K., A. Cuypers, A. Lambrechts, B. Semane, P. Hoet, A.V. Laere, and J. Vangronsveld. 2005. Induction of oxidative stress and antioxidative mechanism in *Phaseolus vulgaris* after Cd application. *Plant Physiol. Biochem.* 43(5): 437-444.
- Staessen, J.A., H.A. Roels, D. Emelianov, T. Kuznetsova, L. Thijs, J. Vangronsveld, and R. Fagard. 1999. Environmental exposure to cadmium, forearm bone density, and risk of fractures: A prospective population study. *Lancet* 353(9159): 1140-1144.
- Tokunaga, S., and T. Hakuta. 2002. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil. *Chemosphere* 46: 31-38.
- Ure, A.M. 1995. Methods of analysis for heavy metals in soils. p.58-102. *In: B.J. Alloway (ed.) Heavy Metals in Soils.* 2<sup>nd</sup> ed. Blackie Acad. Prof. London.
- Vangronsveld, J., and S.D. Cunningham. 1998. Introduction to the concepts. p.1-15. *In: J. Vangronsveld and S.D. Cunningham (eds.) Metal-Contaminated Soils: In Situ Inactivation and Phytoremediation.* Springer-Verlag. Berlin.
- Virkutyte, J., M. Sillanpaa, and P. Latostenmaa. 2002. Electrokinetic soil remediation – critical overview. *Sci. Total Environment* 289: 97-121.