

# Spesiasi Aluminium Terlarut dan Sifat Kimia Ultisol yang Diameliorasi dengan Dolomit dan Lignit-Teraktivasi

## (Soluble Aluminum Speciation and Chemical Properties of Ultisol Amended with Dolomite and Activated-Lignite)

Fahmi Arief Rahman<sup>1\*</sup>, Budi Nugroho<sup>2</sup>, Atang Sutandi<sup>2</sup>, Untung Sudadi<sup>2</sup>

(Diterima April 2019/Disetujui Juni 2020)

### ABSTRAK

Fitotoksisitas aluminium (Al), baik secara langsung pada pertumbuhan tanaman maupun secara tidak langsung melalui peningkatan kemasaman tanah, berkaitan erat dengan keberadaan berbagai spesies Al dalam larutan tanah. Al<sup>3+</sup> dan Al-monomer merupakan spesies utama Al-terlarut penyebab fitotoksisitas pada tanah berkadar Al tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh ameliorasi dolomit dan batubara muda atau lignit teraktivasi-basa (LTB) pada perubahan spesies Al-terlarut dan sifat kimia tanah lainnya serta respons pertumbuhan vegetatif kedelai (*Glycine max* Merr) pada Ultisol Jasinga (Al-dd 16,03 cmol(+)/kg). Percobaan rumah kaca dilakukan dalam Rancangan Acak Lengkap dengan ameliorasi dolomit dan LTB sebagai perlakuan, masing-masing dengan tiga taraf, yaitu 0, 1, 1,5 x Al-dapat ditukar (Al-dd) dan 0, 2,5, 5 ton/ha dan tiga ulangan. Amelioran diinkubasi satu minggu pada kondisi kadar air kapasitas lapang sebelum penanaman kedelai selama satu bulan. Spesiasi Al-terlarut tanah dilakukan dengan metode kolorimetri aluminon untuk menetapkan Al-terlarut total serta spesies Al-monomer inorganik, Al-monomer organik, dan Al-polimer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hanya ameliorasi dolomit yang berpengaruh nyata meningkatkan pH-H<sub>2</sub>O, pH-KCl, Ca-dd, Na-dd tanah, dan penurunan kadar Al-dd, kecuali pada kadar semua spesies Al-terlarut yang hanya menunjukkan kecenderungan menurun. Kadar Al-dd tanah berkorelasi nyata negatif dengan parameter ukur kedelai, yaitu tinggi, panjang akar, bobot basah, bobot kering, dan kadar Ca-tanaman. Hal ini mengindikasikan bahwa evaluasi fitotoksisitas Al tanah cukup didasarkan atas hasil analisis tanah rutin kadar Al-dd.

Kata kunci: Al-dapat ditukar, Al-monomer inorganik, Al-monomer organik, Al-polimer

### ABSTRACT

Phytotoxicity of soil aluminum (Al), both directly to the plant growth as well as indirectly through the increase of soil potential acidity, is closely related to the occurrence of various soil soluble-Al species. Amongst them, Al<sup>3+</sup> and monomeric-Al species are the primary causes of Al phytotoxicity in soils with high Al content. This study was aimed to evaluate the effects of soil amelioration with dolomite and base-activated lignite (BAL) on changes in soluble-Al species and other soil chemical properties, and vegetative growth of soybean (*Glycine max* Merr) on Ultisol of Jasinga (Al-dd 16,03 cmol(+)/kg). A green house experiment was conducted by applying a Completely Randomized Design with dolomite and BAL amelioration as the treatments, each with three levels of respectively 0, 1, 1,5 x exchangeable-Al and 0, 2,5, 5 tons BAL ha<sup>-1</sup>, and three replications. The ameliorants were incubated at field capacity of soil moisture content for one week before planting soybean for one month. Soil soluble-Al speciation was carried out using colorimetric aluminon method to determine concentrations of total soluble-Al, monomeric-Al, and polymeric-Al species. Monomeric-Al were further speciated into inorganic monomeric-Al and organic monomeric-Al species. The results revealed that only dolomite amelioration that significantly increased soil pH-H<sub>2</sub>O, pH-KCl, Ca-dd, Na-dd, and decreased exchangeable-Al concentration, except for those of all soluble-Al species that only showed a decreasing trend. Soil exchangeable-Al that was negatively and significantly correlated with soybean measure parameters were plant height, root length, total roots and shoots wet and dry weights, as well as Ca concentration. These results indicated that soil Al phytotoxicity evaluation could be relied on the result of routine analysis on soil exchangeable-Al concentration.

Keywords: exchangeable-Al, inorganic monomeric-Al, organic monomeric-Al, polymeric-Al

### PENDAHULUAN

Ultisol dapat memiliki kejenuhan Al lebih dari 30% sehingga sangat berpeluang menimbulkan

fitotoksisitas atau keracunan Al bagi tanaman. Gejala umum fitotoksisitas Al adalah hambatan pertumbuhan akar (Yang & Horst 2015). Fitotoksisitas Al berkaitan erat dengan keberadaan berbagai bentuk kimia atau spesies Al, terutama pada fasa larutan tanah. Al<sup>3+</sup> dan Al-monomer inorganik, seperti Al-F dan Al-SO<sub>4</sub>, merupakan spesies utama Al-terlarut tanah penyebab fitotoksisitas dan merupakan indikator yang sensitif

<sup>1</sup> Sekolah Pascasarjana, Program Studi Ilmu Tanah, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

<sup>2</sup> Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian IPB, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga, Bogor 16680

\* Penulis Korespondensi: Email: [mailnyafahmi@gmail.com](mailto:mailnyafahmi@gmail.com)

berkaitan dengan cekaman akar dan pertumbuhan tanaman di tanah masam (Shen *et al.* 2008).

Solusi permasalahan fitotoksisitas Al pada tanah mineral masam, seperti Ultisol, antara lain adalah dengan aplikasi amelioran, seperti kapur dolomit  $[(CaMg)_2CO_3]$  dan bahan penjerap atau *adsorbent* Al berbasis karbon, seperti lignit atau batubara muda teraktivasi. Berbagai penelitian telah membuktikan bahwa dolomit efektif dalam menurunkan kelarutan Al dan meningkatkan pH tanah. Lignit teraktivasi-basa dilaporkan memiliki kapasitas adsorpsi tinggi terhadap Al. Kapasitas adsorpsi lignit tanpa aktivasi Al dilaporkan 286-370  $mg.g^{-1}$  dan mencapai 435  $mg.g^{-1}$  dengan perlakuan aktivasi basa (Qi *et al.* 2011).

Aktivasi lignit dapat dilakukan dengan teknik fisika melalui pemanasan dan teknik kimia melalui penambahan basa, seperti KOH atau garam-garam klorida, seperti NaCl, KCl,  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ , dan  $AlCl_3$  (Ioannidou dan Zabaniotou 2007). Deprotonisasi gugus-gugus fungsional OH-terbuka pada permukaan *adsorbent* (Tan 2011), seperti lignit, merupakan mekanisme aktivasi kimiawi yang menyebabkan peningkatan kerapatan muatan negatif sehingga lignit teraktivasi menjadi lebih reaktif dalam mengadsorpsi kation logam, seperti Al. Kombinasi ameliorasi dolomit dan lignit teraktivasi-basa (LTB) diharapkan lebih efektif untuk mengatasi permasalahan kesuburan kimia tanah dan pertumbuhan tanaman pada tanah berkadar Al tinggi. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi pengaruh ameliorasi dolomit dan LTB pada perubahan spesies Al-terlarut dan sifat kimia tanah lainnya serta respons pertumbuhan vegetatif kedelai pada Ultisol Jasinga.

## METODE PENELITIAN

### Tempat dan Waktu

Contoh tanah ruah (*bulk soil samples*) diambil secara komposit pada lapisan 30 cm teratas area kebun campuran di Kecamatan Jasinga, Kabupaten Bogor, Jawa Barat pada posisi koordinat 6°45'56" LS dan 106°44'91" BT. Contoh lignit diperoleh dari area tambang di Kabupaten Lebak, Banten. Percobaan dilakukan di rumah kaca Kebun Percobaan Cikabayan, Fakultas Pertanian, IPB. Analisis kimia tanah, dolomit, lignit, dan jaringan tanaman dilakukan di Laboratorium Kimia dan Kesuburan Tanah, Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB. Penelitian dilakukan sejak April–September 2018.

### Rancangan Penelitian

Bahan utama penelitian ini meliputi tanah pucuk Ultisol Jasinga kering udara yang lolos saringan 2 mm, dolomit, LTB, benih kedelai, dan bahan-bahan kimia. Bahan LTB dipersiapkan dengan proses aktivasi kimiawi, yakni mencampurkan 5,92 g KOH.kg<sup>-1</sup> lignit yang telah lolos saringan 2 mm lalu diberi air sampai kapasitas lapang kemudian diinkubasi selama satu minggu sebelum dicampurkan dengan Ultisol Jasinga.

Percobaan rumah kaca dilakukan dalam RAL Faktorial dengan ameliorasi dolomit dan LTB sebagai perlakuan, masing-masing dengan tiga taraf, yaitu 0, 1, dan 1,5 x Al-dd serta 0, 2,5, dan 5 ton LTB.ha<sup>-1</sup> dan tiga ulangan. Amelioran diinkubasi dalam kondisi kadar air tanah pada kapasitas lapang satu minggu sebelum penanaman dan pemeliharaan kedelai selama satu bulan. Pengamatan pertumbuhan vegetatif kedelai dilakukan pada tinggi, panjang akar, serta bobot basah dan bobot kering total akar dan tajuk. Pada akhir masa percobaan dilakukan analisis tanah berupa pH-H<sub>2</sub>O, pH-KCl, KTK, C-organik, K-dd, Na-dd, Ca-dd, Mg-dd, Al-dd, spesiasi Al-terlarut, dan jaringan tanaman. Analisis data dilakukan dengan *anova* pada semua parameter, dan dilanjutkan dengan *DMRT* bagi parameter yang dipengaruhi secara nyata (5%). Analisis korelasi Pearson dilakukan antarparameter tanah dan tanaman.

### Prosedur Analisis Laboratorium

Analisis tanah, dolomit, LTB, dan jaringan tanaman dilakukan dengan metode rutin. Spesiasi Al-terlarut tanah dilakukan dengan metode kolorimetri aluminon (Hsu 1963). Larutan tanah untuk spesiasi Al-terlarut diperoleh dengan mengekstraksi tanah menggunakan pengekstrak Morgan atau larutan 10% Na-asetat dengan nisbah tanah:pelarut 1:10 (Jones dan Thurman 1957).

Kadar Al-total terlarut ditetapkan dengan menambahkan ± 25 mL aquades, 2 mL larutan thioglycolic *acid*, dan 1,2 mL N HCl ke labu takar-50 mL berisi 4 mL larutan tanah; kemudian dipanaskan dalam *water bath* (80 °C, 30 menit), didinginkan 1-2 jam, ditambahkan 10 mL larutan aluminon-asetat *buffer*, ditera dengan aquades, dan didiamkan 30 menit. Kadar Al ditetapkan menggunakan seri larutan standar yang disiapkan dari 0, 1, 2, ... 6 mL larutan 5 ppm Al dari 0.001 M  $Al(NO_3)_3$ . Kadar Al-monomer ditetapkan dengan prosedur seperti penetapan Al-terlarut total tanpa penambahan HCl dan pemanasan dalam *water bath*. Kadar Al-polimer adalah selisih antara kadar Al-terlarut total dan Al-monomer.

Spesies Al-monomer dispesiasi lebih lanjut sebagai Al-monomer inorganik dan Al-monomer organik (Kerven *et al.* 1989). Kadar Al-monomer inorganik ditetapkan dengan prosedur seperti penetapan Al-monomer, namun menggunakan larutan standar yang disiapkan dengan mencampurkan 0.001 M  $Al(NO_3)_3$  dan 0.010 M Al oksalat masing-masing dengan kadar 25, 50, dan 100  $\mu M$  Al; menambahkan 0.1 mL 0,5% asam askorbat dan 10 mL aluminon-asetat *buffer* 30 detik sebelum pengukuran. Larutan 0.010 M Al-oksalat dibuat dengan melarutkan 126 mg asam oksalat dalam 60 ml aquades, menambahkan 1 mL 0.001 M  $Al(NO_3)_3$ ; menyesuaikan pH larutan secara perlahan menjadi 4,5 menggunakan M KOH sambil terus diaduk; dan diencerkan dengan aquades hingga bervolume 100 mL. Kadar Al-monomer organik adalah selisih antara kadar Al-monomer dan Al monomer inorganik. Kadar

Al diukur menggunakan spektrofotometer pada panjang gelombang 530 nm.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Sifat kimia utama tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah bereaksi masam, berkadar C-organik dan KTK rendah, serta kejenuhan Al sangat tinggi (Tabel 1).

### Sifat Kimia Tanah

Hasil *anova* dan *DMRT* menunjukkan hanya ameliorasi dolomit yang berpengaruh nyata pada pH H<sub>2</sub>O, pH KCl, Ca-dd, dan Al-dd, namun tidak berpengaruh nyata pada C-organik dan Mg-dd tanah (Tabel 2). LTB tidak berpengaruh nyata pada semua parameter tanah dan tanaman kecuali interaksi dolomit dan LTB hanya berpengaruh nyata pada KTK tanah (Tabel 3). Meskipun mengandung 40,34% C-organik (Tabel 1), ameliorasi LTB hanya cenderung meningkatkan C-organik tanah. Demikian pula halnya dengan ameliorasi dolomit (Gambar 1).

Perlakuan LTB tidak berpengaruh nyata pada semua parameter karena jumlah komponen teraktivasi pada lignit bergantung pada ukuran partikel lignit yang digunakan, jenis basa pengekstrak, dan suhu proses ekstraksi (Hoffmann *et al.* 2012). Lignit berukuran 0.2

mm akan menghasilkan asam humat 17% lebih tinggi dibandingkan dengan lignit berukuran 2 mm dengan menggunakan pengekstrak KOH, dan akan menghasilkan asam humat lebih tinggi 5% dengan NaOH. Pada temperatur 190° C akan menghasilkan asam humat 70% lebih tinggi dibandingkan pada suhu 130° C. Temperatur tinggi juga akan meningkatkan muatan negatif pada asam humat (Cheng *et al.* 2019).

Meskipun berpengaruh nyata, ameliorasi dolomit hanya meningkatkan pH H<sub>2</sub>O dari 4.06 tanpa dolomit menjadi 4,14 dengan ameliorasi dolomit 1 x Al-dd. Hal ini menunjukkan bahwa harkat reaksi tanah menurun dari masam pada contoh tanah awal (Tabel 1) menjadi sangat masam pada akhir masa percobaan (Tabel 2).

Reaksi pengapuran menggunakan dolomit terjadi melalui tahapan pelarutan untuk menghasilkan Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, dan OH<sup>-</sup> [(Ca,Mg)CO<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>O → Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> + HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> + OH<sup>-</sup>], netralisasi H<sup>+</sup> di larutan tanah oleh OH<sup>-</sup> membentuk H<sub>2</sub>O [OH<sup>-</sup> + H<sup>+</sup> → H<sub>2</sub>O], dan pertukaran Al<sup>3+</sup> dan H<sup>+</sup> pada permukaan adsorpsi atau kompleks pertukaran klei tanah oleh Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, dan OH<sup>-</sup> untuk selanjutnya bersenyawa dengan OH<sup>-</sup> dalam larutan tanah membentuk Al(OH)<sub>3</sub> yang diendapkan dan H<sub>2</sub>O [Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> + klei tanah + Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup> → klei tanah + Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> + Al<sup>3+</sup>, H<sup>+</sup>] dan [3OH<sup>-</sup> + Al<sup>3+</sup> → Al(OH)<sub>3</sub> (p); OH<sup>-</sup> + H<sup>+</sup> → H<sub>2</sub>O]. Kecepatan pelarutan dolomit dalam menghasilkan OH<sup>-</sup> menentukan kinetika peningkatan pH dan penurunan kadar Al-dd tanah (Nduwumuremyi 2013; Tisdale *et al.* 1985).

Tabel 1 Hasil analisis awal contoh tanah Ultisol Jasinga, dolomit, dan lignit

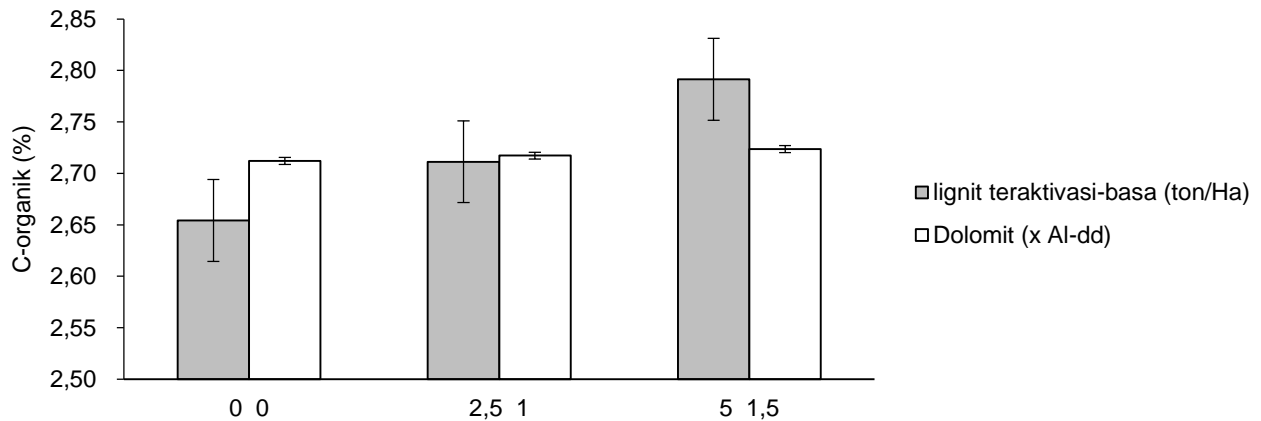
Parameter	Metode	Dolomit	Lignit	Tanah
pH H <sub>2</sub> O	pH meter (1:5)	- <sup>2)</sup>	4,09	4,62/M <sup>1)</sup>
pH KCl	pH meter (1:5)	-	3,16	3,52
CaO (%)	Pengabuan Basah	33,4	-	-
MgO (%)	Pengabuan Basah	16,3	-	-
Daya Netralisasi (%)	CaCO <sub>3</sub> ekuivalen	100,39	-	-
C-organik (%)	Walkley and Black	-	40,34	2,89/S
KTK (cmol(+)/kg)	N NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	-	24,96	15,90/R
K-dd (cmol(+)/kg)	N NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	-	-	0,36/R
Na-dd (cmol(+)/kg)	N NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	-	-	0,38/R
Ca-dd (cmol(+)/kg)	N NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	-	0,45	0,80/SR
Mg-dd (cmol(+)/kg)	N NH <sub>4</sub> OAc, pH 7	-	0,84	0,79/R
Al-dd (cmol(+)/kg)	N KCl	-	1,20	16,03
Kejenuhan Al (%) <sup>3)</sup>	Perhitungan	-	-	87,31/ST
<i>Spesies Al-terlarut (ppm)</i>				
Al-total	Hsu (1963)	-	-	2,92
Al-monomer	Hsu (1963)	-	-	2,59
Al-polimer	Hsu (1963)	-	-	0,33
Al-monomer inorganik	Kerven <i>et al.</i> (1989)	-	-	2,32
Al-monomer organik	Kerven <i>et al.</i> (1989)	-	-	0,27

Keterangan: <sup>1)</sup> Harkat berdasarkan Evi & Sulaeman (2005): M = Masam; S = Sedang, R = Rendah; ST = Sangat tinggi, <sup>2)</sup> Tidak ditetapkan, dan <sup>3)</sup> Kejenuhan Al (%) = Al-dd / (K-dd+Na-dd+Ca-dd+Mg-dd+Al-dd) x 100%.

Tabel 2 Pengaruh ameliorasi dolomit pada pH H<sub>2</sub>O, pH KCl, kadar C-organik, Ca-dd, Mg-dd, dan Al-dd tanah pada akhir masa percobaan

Perlakuan	pH H <sub>2</sub> O	pH KCl	C-org (%)	Ca-dd	Mg-dd (cmol(+)/kg)	Al-dd
D0 (0 x Al <sub>dd</sub> )	4,06 (a)	3,52 (a)	2,71 (a)	1,52 (a)	2,46 (a)	15,03 (a)
D1 (1 x Al <sub>dd</sub> )	4,12 (b)	3,61 (b)	2,72 (a)	3,87 (b)	2,46 (a)	13,92 (b)
D2 (1,5 x Al <sub>dd</sub> )	4,14 (b)	3,63 (c)	2,72 (a)	4,85 (c)	2,09 (a)	13,85 (b)

Keterangan: Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan pengaruh nyata pada taraf uji 5%.



Gambar 1 Kecenderungan peningkatan kadar karbon organik tanah pada akhir masa percobaan akibat pengaruh tunggal ameliorasi dolomit atau lignit teraktivasi-basa.

Pengapuran dapat meningkatkan pH, kejenuhan basa, C-organik, Ca-dd, dan Mg-dd serta mengurangi kadar dan fitotoksisitas Al dan Mn pada tanah masam (Fageria & Stone 2004). Efisiensi bahan kapur ditentukan oleh daya netralisasi, ukuran dan distribusi partikel, dosis dan cara aplikasi yang menentukan rata-ratanya ketersediaan dan sebarannya dalam tanah (Foth & Ellis 1996). Ameliorasi dolomit dengan dosis 1,5 x Al-dd dalam penelitian ini meningkatkan kadar Ca-dd tiga kali lipat dibandingkan dengan tanpa dolomit (Tabel 2).

Pengaruh nyata interaksi ameliorasi dolomit dan LTB pada KTK (Tabel 3) berkaitan dengan reaksi pertukaran  $H^+$  dan  $Al^{3+}$  dari kompleks jerapan. Dilaporkan bahwa  $Ca^{2+}$  dan  $Mg^{2+}$  dalam material berpori, seperti lignit, dapat meningkatkan kapasitas pertukaran dan efisiensi adsorpsi  $Cu^{2+}$ , seperti dolomit (Cao *et al.* 2018). Peningkatan KTK akibat ameliorasi adsorbent organik, seperti lignit teraktivasi, juga terjadi melalui mekanisme deprotonasi gugus fungsional karboksil- dan fenol-OH pada bahan humik yang dikandungnya (Adani *et al.* 1998). Mekanisme ini meningkatkan muatan negatif sehingga meningkatkan KTK dan pelepasan  $H^+$  yang dinetralkan oleh  $OH^-$  dari dolomit sehingga pH tanah tetap meningkat (Tan 2011). KTK tanah pada taraf ameliorasi D2LTB0 lebih rendah daripada D2LTB1 dan D2LTB2 tetapi notasinya sama sehingga peningkatan KTK tanah lebih efisien hanya dengan ameliorasi dolomit pada dosis D2 tanpa LTB (Tabel 3).

Ameliorasi dolomit juga dapat meningkatkan C-organik tanah. Ameliorasi dolomit memberikan keuntungan dalam pembentukan C-organik tanah melalui proses fiksasi mikrobial (Xiao *et al.* 2016) oleh mikrob fotoautotrof seperti *cyanobacteria* maupun mikrob kemoautotrof, seperti *carbon-monoxide-oxidizing bacteria* yang dapat mengasimilasi  $CO_2$  menjadi C-seluler (Wang *et al.* 2014) untuk selanjutnya menyumbang dan meningkatkan C-organik tanah. Lignit tersusun atas asam humik, asam fulvik, dan turunannya yang dapat menyumbang C organik tanah

dan mengurangi fitotoksisitas  $Al^{3+}$  dan  $Fe^{3+}$  (Gerke 1993).

### Spesies Al-terlarut Tanah

Ameliorasi dolomit dan LTB tidak berpengaruh nyata pada spesiasi Al-terlarut tanah (Tabel 4). Meskipun demikian, kadar Al-total terlarut, Al-monomer, maupun Al-polimer cenderung menurun akibat ameliorasi dolomit. Hal ini terjadi karena pH tanah di akhir masa percobaan berharkat sangat masam sehingga adsorpsi Al cenderung lemah (Robles *et al.* 2016). Pelarutan dolomit menghasilkan  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ , dan  $OH^-$ . Kedua kation tersebut akan melepaskan  $Al^{3+}$  dari kompleks pertukaran klei ke larutan tanah dan  $OH^-$  akan mengubahnya menjadi spesies Al-OH dengan berbagai tingkat kelarutan hingga menetralkannya menjadi endapan  $Al(OH)_3$ . Kelarutan Al-OH yang terbentuk bergantung pada pH tanah. Pada  $pH < 4,5$ , larutan tanah cenderung didominasi spesies Al-monomer, seperti yang terjadi pada penelitian ini (Tabel 4). Pada  $pH > 4,5$  cenderung terjadi perubahan dari Al-monomer ( $AlOH^{2+}$  dan  $Al(OH)_2^+$ ) menjadi Al-polimer, seperti  $Al_6(OH)_{15}^{3+}$  (Hsu dan Rich 1960) hingga gipsit  $[Al(OH)_3]$  jika pH tanah meningkat lebih tinggi (Frink dan Peech. 1962).

### Pertumbuhan Vegetatif Kedelai

Hasil *anova* menunjukkan bahwa hanya ameliorasi dolomit yang berpengaruh nyata positif pada tinggi, panjang akar, bobot basah, dan bobot kering kedelai (Tabel 5). Hal ini karena ameliorasi dolomit dapat meningkatkan ketersediaan hara, terutama hara makro dan menekan fitotoksisitas Al (Fageria dan Stone 2004).

Keberadaan Al dalam tanah berpengaruh pada serapan hara, di antaranya Ca dan Mg. Ameliorasi dolomit pada kadar Al dan Mg jaringan tanaman tidak nyata, meskipun cenderung meningkat dengan peningkatan taraf perlakuan, namun berpengaruh nyata positif pada kadar Ca jaringan tanaman (Tabel 6). Adanya anion hidroksida dan fosfat di zona perakaran menyebabkan penurunan 20% kadar Al

Tabel 3 KTK tanah lignit teraktivasi basa pada (cmol(+)/kg)

Dolomit	Lignit teraktivasi-basa		
	LTB0 (0 ton/ha)	LTB1 (2,5 ton/ha)	LTB2 (5 ton/ha)
D0 (0 x Al <sub>dd</sub> )	17,07 <sup>a1)</sup>	19,27 <sup>c</sup>	19,73 <sup>cd</sup>
D1 (1 x Al <sub>dd</sub> )	19,40 <sup>cd</sup>	18,80 <sup>b</sup>	19,33 <sup>c</sup>
D2 (1.5 x Al <sub>dd</sub> )	20,20 <sup>de</sup>	22,60 <sup>e</sup>	21,93 <sup>e</sup>

Keterangan: <sup>1)</sup> Huruf yang berbeda menunjukkan pengaruh nyata pada taraf uji 5%.

Tabel 4 Pengaruh tunggal ameliorasi dolomit pada spesies Al-terlarut tanah pada akhir masa percobaan

Perlakuan	Al-total (ppm)	Al-monomer (ppm)	Al-polimer (ppm)
D0 (0 x Al <sub>dd</sub> )	2,91 <sup>a1)</sup>	2,59 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>
D1 (1 x Al <sub>dd</sub> )	2,87 <sup>a</sup>	2,56 <sup>a</sup>	0,31 <sup>a</sup>
D2 (1.5 x Al <sub>dd</sub> )	2,80 <sup>a</sup>	2,54 <sup>a</sup>	0,27 <sup>a</sup>

Keterangan: <sup>1)</sup> Huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan pengaruh tidak nyata pada taraf uji 5%

Tabel 5 Pengaruh tunggal ameliorasi dolomit pada tinggi, panjang akar, bobot basah, dan bobot kering total akar dan tajuk kedelai pada umur satu bulan

Perlakuan	Tinggi (cm)	Panjang akar (cm)	Bobot basah (g)	Bobot kering (g)
D0 (0 x Al <sub>dd</sub> )	15,73 <sup>a1)</sup>	12,37 <sup>a</sup>	1,00 <sup>a</sup>	0,32 <sup>a</sup>
D1 (1 x Al <sub>dd</sub> )	17,45 <sup>b</sup>	17,58 <sup>b</sup>	2,06 <sup>b</sup>	0,60 <sup>b</sup>
D2 (1.5 x Al <sub>dd</sub> )	19,22 <sup>c</sup>	18,92 <sup>b</sup>	2,21 <sup>b</sup>	0,67 <sup>b</sup>

Keterangan: <sup>1)</sup> Huruf yang berbeda pada kolom yang sama menunjukkan pengaruh nyata pada taraf uji 5%.

Tabel 6 Pengaruh tunggal ameliorasi dolomit pada kadar Al, Ca, dan Mg jaringan kedelai pada umur satu bulan

Perlakuan	Kadar dalam jaringan kedelai umur satu bulan		
	Al (%)	Ca (%)	Mg (%)
D0 (0 x Al <sub>dd</sub> )	1,85 <sup>a1)</sup>	0,09 <sup>a</sup>	0,07 <sup>a</sup>
D1 (1 x Al <sub>dd</sub> )	2,31 <sup>a</sup>	0,18 <sup>b</sup>	0,07 <sup>a</sup>
D2 (1.5 x Al <sub>dd</sub> )	2,09 <sup>a</sup>	0,23 <sup>b</sup>	0,09 <sup>a</sup>

Keterangan: <sup>1)</sup> Huruf yang sama pada kolom yang sama menunjukkan pengaruh tidak nyata pada taraf uji 5%.

pada akar tanaman (Raynal *et al.* 1990) karena sebagian besar Al terpresipitasi sebagai Al-hidroksida atau Al-fosfat di luar sel akar (Clarkson 1966). Hal ini yang diduga sebagai penyebab kadar Al pada jaringan tanaman tidak berbeda nyata akibat ameliorasi dolomit. Ameliorasi dolomit pada taraf 1 kali Al-dd meningkatkan kadar Ca jaringan tanaman dua kali lipat dibandingkan tanpa perlakuan. Kadar Ca-dd tanah meningkat secara nyata, sedangkan kadar Mg-dd tanah tidak berbeda nyata akibat perlakuan yang sama (Tabel 2). Hal ini sesuai dengan kadar CaO dolomit yang dua kali lipat dibandingkan MgO (Tabel 1).

Interaksi Al<sup>3+</sup> dan Ca<sup>2+</sup> merupakan faktor utama yang memengaruhi serapan dan transport Ca dalam jaringan tanaman. Endositosis Al<sup>3+</sup> berperan dalam penyerapan kation tersebut (Akeson & Unns 1990) sehingga kemungkinan Al<sup>3+</sup> diserap tanaman melalui jalan masuk serapan Ca atau melalui saluran kation nonspesifik (Liu & Luan 2001). Hal ini yang diduga menyebabkan kecenderungan peningkatan kadar Al seiring dengan peningkatan kadar Ca jaringan tanaman. Peningkatan kadar Al dan Si yang seiring dengan serapan Ca dilaporkan terjadi pada akar gandum dengan *genotipe* sensitif maupun toleran Al (Silva *et al.* 2010). Sebaliknya, peningkatan kadar Al<sup>3+</sup> dilaporkan menyebabkan penurunan kadar Ca<sup>2+</sup> pada semua bagian akar gandum (Jones *et al.* 1998). Al<sup>3+</sup> juga dapat menurunkan akumulasi serapan Mg<sup>2+</sup> (Rengel & Robinson 1989). Hal ini disebabkan oleh

perubahan sifat dan struktur membran akar akibat fitotoksisitas Al (Taylor *et al.* 1998).

Dalam penelitian ini, kadar Al jaringan tanaman tidak berbeda nyata akibat perlakuan karena sebagian besar Al diduga terlokalisasi di akar atau ujung akar kedelai. Efek fitotoksisitas Al terlokalisasi pada zona transisi ujung akar (Sivaguru & Horst 1998) atau pada zona *apex* meristem akar, seperti ujung, meristem, dan zona perpanjangan akar (Ryan *et al.* 1993). Adanya Al pada *apex* meristem akar dapat menghambat pertumbuhan tanaman, bukan karena penghambatan pertumbuhan akar vertikal maupun lateral melainkan karena gangguan mekanisme di dalam sel yang menyebabkan akar tidak dapat menyerap hara dan air (Samac & Tesfaye 2003).

#### Korelasi Al-dd dan Spesies Al-terlarut Tanah dengan Parameter Pertumbuhan Kedelai

Hasil analisis korelasi Pearson menunjukkan kadar Al-dd tanah berkorelasi sangat nyata negatif dengan tinggi, panjang akar, bobot basah, bobot kering, dan kadar Ca-jaringan tanaman. Kadar Al-terlarut total hanya berkorelasi nyata negatif dengan tinggi tanaman, yang lebih disebabkan oleh kadar Al-monomer inorganik daripada Al-monomer organik yang masing-masing berkorelasi nyata negatif dan positif dengan panjang akar kedelai (Tabel 7).

Menurut Blamey *et al.* (1983), Al<sup>3+</sup> dan Al-OH merupakan spesies Al-monomer inorganik tanah yang

Tabel 7 Nilai korelasi Pearson yang nyata dan sangat nyata antarparameter pertumbuhan vegetatif kedelai umur satu bulan dengan kadar Al-dd dan spesies Al-terlarut tanah

Parameter pertumbuhan vegetatif kedelai		Al-dd	Al-total	Al-monomer inorganik	Al-monomer organik
Tinggi	r	-0,69	-0,40	-0,35	0,35
	p value	0,000**	0,039*	0,078	0,078
Panjang akar	r	-0,62	-0,32	-0,45	0,45
	p value	0,001**	0,098	0,018*	0,018*
Bobot basah	r	-0,72	-0,19	-0,32	0,32
	p value	0,000**	0,331	0,101	0,101
Bobot kering	r	-0,71	-0,19	-0,29	0,29
	p value	0,000**	0,329	0,154	0,154
Kadar Ca-jaringan	r	-0,60	-0,26	-0,33	0,33
	p value	0,001**	0,194	0,094	0,094

Keterangan: \* Sangat nyata ( $p < 0,01$ ) dan \*\* Nyata (nilai  $p < 0,05$ ).

berperan dalam penghambatan pertumbuhan akar kedelai. Kadar Al-monomer inorganik  $9.3 \mu\text{M}$  dalam larutan tanah akan mengurangi 50% pertumbuhan akar (Wright *et al.* 1987) karena hambatan proses pembelahan (Ryan *et al.* 2011) pada sel *plumula* dan *radikula* di fase awal perkecambah (Ranal *et al.* 2016).

Berdasarkan hasil penelitian ini maka dapat dinyatakan bahwa evaluasi fitotoksisitas Al tanah cukup didasarkan atas hasil analisis rutin kadar Al-dd.

## KESIMPULAN

Ameliorasi dolomit berpengaruh nyata meningkatkan pH  $\text{H}_2\text{O}$ , pH KCl, Ca-dd tanah, tinggi, panjang akar, bobot basah, bobot kering, dan Ca-tanaman, serta menurunkan Al-dd tanah. Interaksi ameliorasi dolomit dan lignin teraktivasi-basa berpengaruh nyata meningkatkan KTK tanah. Kadar Al-dd tanah berkorelasi nyata negatif dengan tinggi, panjang akar, bobot basah, bobot kering, dan Ca-tanaman. Kadar Al-total hanya berkorelasi nyata negatif dengan tinggi tanaman, sedangkan kadar spesies Al-monomer inorganik dan Al-monomer organik masing-masing hanya berkorelasi nyata negatif dan positif dengan panjang akar kedelai.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adani F, Genevini P, Zaccheo P, Zocchi G. 1998. The effect of commercial humic acid on tomato plant growth and mineral nutrition. *Journal Plant Nutrition*. 21(3): 561–575. <https://doi.org/10.1080/01904169809365424>
- Akeson M, Unns DN. 1990. Uptake of aluminum into root cytoplasm: Predicted rates for important solution complexes. *Journal Plant Nutrition*. 13: 467–484. <https://doi.org/10.1080/01904169009364093>
- Blamey FPC, Edwards DG, Asher CJ. 1983. Effects of Aluminum-OH:Al molar ratios and ionic strength on soybean root elongation in solution culture. *Soil Science*. 136: 197–207. <https://doi.org/10.1097/00010694-198310000-00001>
- Cao ZF, Chen P, Yang F, Wang S, Zhong H. 2018. Transforming structure of dolomite to enhance its ion-exchange capacity for copper (II). *Colloids and Surfaces A*. 539: 201–208. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2017.12.032>
- Cheng G, Niu Z, Zhang C, Zhang X, Li X. 2019. Extraction of humic acid from lignite by KOH-hydrothermal Method. *Applied Sciences*. 9(1356): 1–13. <https://doi.org/10.3390/app9071356>
- Clarkson DT. 1966. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant Physiology*. 41:16–172. <https://doi.org/10.1104/pp.41.1.165>
- Eviati, Sulaeman. 2005. *Analisis Kimia Tanah, Tanaman, Air, dan Pupuk*. Edisi ke-2. Bogor (ID): Balai Penelitian Tanah.
- Fageria NK, Stone LF. 2004. Yield of common bean in no-tillage system with application of lime and zinc. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*. 73–78. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000100011>
- Foth HD, Ellis BG. 1996. *Soil Fertility*. 2<sup>nd</sup> Ed. Boca Raton (CA): Lewis Publishers.
- Frink CR, Peech M. 1962. The solubility of gibbsite in aqueous solution and soil extracts. *Soil Science Society of America Journal* 28: 346–347. <https://doi.org/10.2136/sssaj1962.03615995002600040012x>
- Gerke J. 1993. Aluminum complexation by humic substances and aluminum species in the soil solution. *Geoderma*. 63: 165–175. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(94\)90004-3](https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)90004-3)
- Hoffmann K, Huculak-Maczka M. 2012. Assessment of efficiency of humic acids extraction process using different fineness of lignite. *Ecology Chemistry and Engineering A*. 19(9): 1107–1113

- Hsu PH, Rich CL. 1960. Aluminum fixation in a synthetic cation exchanger. *Soil Science Society of America Journal*. 24: 21–25. <https://doi.org/10.2136/sssaj1960.03615995002400010015x>
- Hsu PH. 1963. Effect of initial pH, phosphate and silicate on the determination of aluminum with aluminon. *Soil Science* 96(4): 230–238. <https://doi.org/10.1097/00010694-196310000-00002>
- Loannidou O, Zabaniotou A. 2007. Agricultural residues as precursors for activated Carbon production. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 11: 1966–2005. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.013>
- Jones LH, Thurman DA. 1957. The determination of aluminium in soil, ash and plant materials using eriochrome cyanine R.A. *Plant and Soil*. 9: 131–141. <https://doi.org/10.1007/BF01398921>
- Jones DL, Kochian LV, Gilroy S. 1998. Aluminum induces a decrease in cytosolic calcium concentration in BY-2 tobacco cell cultures. *Plant Physiology*. 116:81–89. <https://doi.org/10.1104/pp.116.1.81>
- Kerven GL, Edward DG, Asher CJ, Hallman PS, Kokot S. 1989. Aluminum determination in soil solution: II. Short-term colorimetric procedure for the measurement of inorganic monomeric aluminum in the presence of organic acid ligand. *Australian Journal of Soil Research*. 91–102. <https://doi.org/10.1071/SR9890091>
- Liu K, Luan S. 2001. Internal aluminum block of plant inward K<sup>+</sup> channels. *Plant Cell*. 13: 1453–1465. <https://doi.org/10.1105/TPC.010016>
- Nduwumuremyi A. 2013. Soil acidification and lime quality: Sources of soil acidity, effects on plant nutrients, efficiency of lime, and liming requirements. *Research and Reviews: Journal of Agriculture and Allied Sciences*. 2: 26–32.
- Qi Y, Hoadley AFA, Chaffee AL, Garnier G. 2011. Characterisation of lignite as an industrial adsorbent. *Fuel*. 90: 1567–1574. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.01.015>
- Ranal MA, Rodrigues CM, Teixeira WF, Oliveira AP, Romero R. 2016. Seed germination of *Microlizia fasciculata*, an apomictic and aluminium accumulator species: Unexpected intraspecific variability in a restricted neotropical savanna area. *Flora* 220: 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2016.02.001>
- Raynal DJ, Joslin JD, Thornton FC, Schaedle M, Henderson GS. 1990. Sensitivity of tree seedlings to aluminum: III. Red spruce and loblolly pine. *Journal of Environmental Quality*. 19: 180–187. <https://doi.org/10.2134/jeq1990.00472425001900020003x>
- Rengel Z, Robinson DL. 1989. Aluminum effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. *Agronomy Journal*. 81: 208–215. <https://doi.org/10.2134/agronj1989.00021962008100020014x>
- Robles I, Bustos E, Lakatos J. 2016. Adsorption study of mercury on lignite in the presence of different anions. *Sustainable Environment Research*. 26: 136–141. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.04.008>
- Ryan PR, Ditomasso JM, Kochian LV. 1993. Aluminum toxicity in roots: An investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. *Journal of Experimental Botany*. 44: 437–446. <https://doi.org/10.1093/jxb/44.2.437>
- Ryan PR, Tyerman SD, Sasaki T, Furuichi T, Yamamoto Y, Zhang WH, Delhaize E. 2011. The identification of aluminum resistance genes provides opportunities for enhancing crop production on acid soils. *Journal of Experimental Botany*. 62: 9–20. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq272>
- Samac DA, Tesfaye M. 2003. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soil, a review. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*. 75: 189–207. <https://doi.org/10.1023/A:1025843829545>
- Shen RF, Yang ZM, Zheng SJ. 2008. *Behavior of Aluminum in Soil-Plant Systems and Adaptation Mechanisms to Aluminum Toxicity In Plants*. Beijing (CHN): Science Press.
- Silva S, Pinto-Carnide O, Martins-Lopes P, Matos M, Guedes-Pinto H, Santos C. 2010. Differential aluminum changes on nutrient accumulation and root differentiation in an Al sensitive vs tolerant wheat. *Environmental and Experimental Botany*. 68:91–98. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.10.005>
- Sivaguru M, Horst WJ. 1998. The distal part of the transition zone is the most aluminum-sensitive apical root zone of maize. *Plant Physiology*. 116: 155–63. <https://doi.org/10.1104/pp.116.1.155>
- Tan KH. 2011. *Principle of Soil Chemistry*. 4<sup>th</sup> Ed. Georgia (US): CRC Press.
- Taylor GJ, Blamey FPC, Edwards DG. 1998. Antagonistic and synergistic interactions between aluminum and manganese on growth of *Vigna unguiculata* at low ionic strength. *Physiologia Plantarum* 104: 183–194. <https://doi.org/10.1034/j.1399-3054.1998.1040206.x>
- Tisdale SL, Nelson WL, Beaton JD. 1985. *Soil Fertility and Fertilizer*. 4<sup>th</sup> ed. London (UK): Colier Mc. Millan.
- Wang Y, Wang L, Shan Y, Hu J, Tsang Y, Hu Y, Fu X, Le Y. 2014. Optimization of inorganic carbon sources to improve the carbon fixation efficiency of

- non-photosynthetic microbial community with different electron donors. *Environmental Technology*. 36(9–12): 1246–1255. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.983991>
- Wright RJ, Baligar VC, Wright SF. 1987. Estimation of phytotoxic aluminum in soil solution using three spectrophotometric methods. *Soil Science Society of America Journal*. 114(3): 224–232. <https://doi.org/10.1097/00010694-198709000-00009>
- Xiao L, Sun Q, Yuan H, Li X, Chu Y, Ruan Y, Lian B. 2016. A feasible way to increase carbon sequestration by adding dolomite and K-feldspar to soil. *Cogent Geoscience* 2(1205324): 1–11. <https://doi.org/10.1080/23312041.2016.1205324>
- Yang ZB, Horst WJ. 2015. Aluminum-induced inhibition of root growth: Roles of cell wall assembly, structure, and function. *Springer*. 24: 253–274. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19968-9_13)