

MEMAHAMI PROSES ADSORPSI ION LOGAM OLEH *CLAY MINERAL*

Jaslin Ikhsan

Kimia FMIPA UNY Yogyakarta

jikhsan@yahoo.com

Abstrak

Meskipun logam berat di lingkungan biasanya terdapat dalam konsentrasi yang rendah, namun sifat racunnya dapat membahayakan kehidupan manusia, hewan dan tumbuhan. Oleh karena itu, transport logam-logam berat dan ion-ion logam lainnya perlu diketahui, agar manusia dapat menyikapi dan memperlakukannya dengan baik dan benar. *Clay mineral* seperti: kaolinite, montmorillonite, illite, dan gibbsite yang terdapat di dalam tanah dapat berperan sangat vital sebagai adsorben ion-ion logam, berfungsi sebagai penetral kontaminan di lingkungan tanah dan air. Tingginya afinitas adsorpsi clay mineral terhadap ion-ion logam tersebut disebabkan oleh besarnya rasio antara luas permukaan dan massa dari *clay mineral*. Ada dua sisi aktif yang terdapat di dalam *clay mineral* yang sangat penting untuk adsorpsi: sisi muka (XH) yang muatannya selalu negatif dan sisi tepi (S-OH) yang muatannya tergantung pada harga pH. Dalam beberapa *clay mineral* seperti montmorillonite, terdapat juga sisi aktif ekstra yang disebut permukaan *interlayer*. Mekanisme reaksi suatu adsorpsi belum umum dikemukakan, padahal di dalam ilmu kimia mekanisme reaksi tersebut dapat memberikan gambaran yang jelas bagi pemahaman proses adsorpsi. Beberapa penelitian terdahulu telah melaporkan bahwa ion-ion logam (M^{n+}) bereaksi dengan permukaan *clay mineral* melalui pembentukan kompleks inner-sphere dengan sisi XH dan SOH.

Abstract

Even though heavy metals are usually present at very low levels, they are potentially hazardous for humans, animals and plants. Therefore, their transport in natural water systems and in the soils should be understood in purpose of being able to treat them well. Clay minerals such as kaolinite, montmorillonite, illite and gibbsite which present in the soils play a very important role acting as adsorbents for the heavy metals, and as decontaminators in natural water and in soil horizons. Clay minerals have a high affinity for cations because of their large surface area-to-mass ratio. Two kinds of active sites in the clay minerals taking part in the adsorption are permanent negatively charged surface sites (XH) and pH-dependently charged edge sites (S-OH). Some clay minerals, such as montmorillonite, have also interlayer regions which play a very significant role in the adsorption. Reaction mechanisms of adsorption have not been much reported. On the other hand, it is important for understanding and explaining adsorption processes. It has been published that metal ions (M^{n+}) adsorbed clay minerals by formation of inner-sphere surface complexes between the metal ions and XH or SOH sites.

A. Pendahuluan

Ditinjau dari segi kimiawi, sistem lingkungan tanah sangatlah kompleks. Sifat kimia tanah sangat bervariasi dari satu tempat ke tempat yang lainnya, meskipun kadang hanya berbeda tempat beberapa meter saja. Tanah mengandung berbagai macam mineral yang dapat diklasifikasikan sebagai *phyllosilicate (clay mineral)*, oksida, hidroksida, karbonat, sulfat, halida, dan sebagainya. Bahkan tanah juga mengandung berbagai macam material organik yang berasal dari hewan maupun tumbuhan. Secara singkat dapat dikatakan bahwa sifat kimia tanah tidak hanya bergantung pada geologi daerah tersebut, namun juga ditentukan oleh tanaman dan hewan yang hidup di sana.

Ion-ion logam (kation) pada umumnya terdapat di dalam tanah, dan beberapa di antaranya, seperti ion kalsium, kalium, dan seng sangat diperlukan oleh tumbuhan dalam jumlah tertentu untuk pertumbuhannya. Oleh karena itu, terdapat istilah Kapasitas Pertukaran Kation (KPK) yang merupakan sifat tanah yang dijadikan sebagai ukuran untuk menentukan kemampuan tanah dalam menyimpan kation yang diperlukan oleh tanaman. KPK ini penting dan menjadi suatu istilah yang dapat dipergunakan untuk menentukan tingkat kesuburan tanah. Namun sebaliknya, di dalam tanah dan air terdapat juga beberapa kation (contoh: Pb^{2+} dan Cd^{2+}) yang keberadaannya kadang membahayakan kehidupan manusia dan hewan karena sifat racunnya.

Proses adsorpsi ion logam oleh permukaan mineral dapat menjadi pengetahuan yang menarik untuk menentukan *transport* atau keberadaan ion-ion tersebut. Dengan mengetahui proses interaksi antara kation dan permukaan mineral, kita dapat menentukan langkah untuk mengontrol ion-ion logam berat yang berbahaya di tanah dan air, serta mampu mengkondisikan tanah yang baik untuk tumbuh suburnya tanaman.

Namun demikian, pembahasan adsorpsi dalam makalah ini hanyalah sebatas model saja, di mana adsorben yang digunakan dalam kebanyakan referensi adalah mineral sintesis dari laboratorium dan bukan dari tanah alam. Dengan pemahaman proses adsorpsi dari suatu model ini, kita diharapkan mampu mengaplikasikan pengetahuan tersebut untuk pengelolaan alam nyata dalam lingkungan tanah dan air.

B. Pembahasan

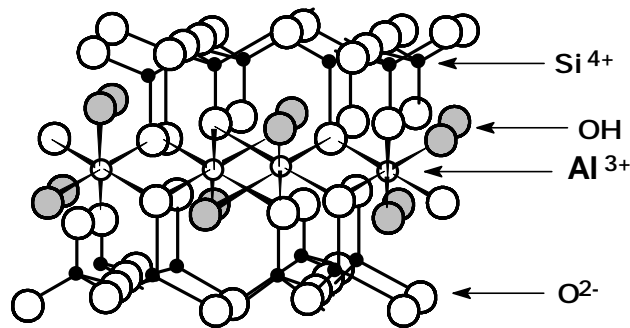
1. Clay Mineral

Clay mineral (phyllosilicate) terdiri dari sebuah grup aluminium silikat dengan suatu struktur berlapis-lapis dan berukuran kecil (kurang dari 2 μm) (Brindley dan Brown, 1984). Selain silicon dan aluminium, *clay mineral* kadang-kadang juga mengandung besi, logam alkali, atau alkali tanah dalam jumlah yang relatif signifikan.

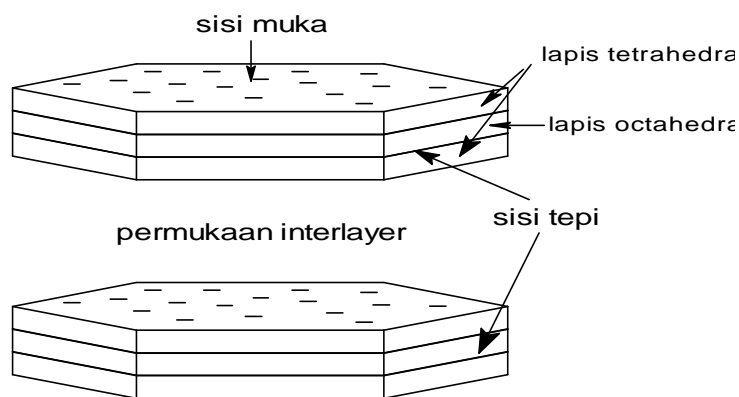
Clay mineral umumnya mempunyai struktur serupa, dan dapat dibedakan dengan X-ray diffraction, electron microscopy, atau analisis thermal differensial. Kebanyakan *clay mineral* tersusun dari dua unit struktur dasar (Gambar 1). Pertama, lapisan silika yang merupakan suatu lapisan tetrahedron silikon-oksigen yang tersusun menjadi network heksagonal dalam dua dimensi, di mana masing-masing tetrahedron mengikat tiga oksigen yang sudah terikat oleh tetrahedron lainnya. Kedua, lapisan oktahedral di mana oksigen atau hidroksil terikat pada suatu ion logam membentuk octahedral. Ion logam tersebut biasanya aluminium, magnesium atau besi. Lapisan tetrahedral dan octahedral kemudian bertumpuk-tumpuk dalam beberapa konfigurasi

membentuk struktur berlapis-lapis. Ikatan yang paling umum terjadi antara tetrahedral dan octahedral tersebut adalah ikatan dengan menggunakan satu oksigen secara bersama-sama (Sposito, 1985; Schulze, 1989).

Clay mineral pada umumnya memiliki struktur lapis 1 : 1 atau 2 : 1. Struktur 1:1 berarti unit struktur dasar *clay mineral* tersebut tersusun dari satu lapis tetrahedral dan satu lapis octahedral. Contoh *clay mineral* ini adalah kaolinite dan hallosite. Sedangkan struktur 2:1 berarti unit struktur dasarnya tersusun dari dua lapis tetrahedral yang mengapit satu lapis octahedral. Contoh *clay mineral* dengan struktur ini adalah montmorillonite, talc, pyrophyllite, mica dan vermiculite (Schulze, 1989). Struktur lapis 2:1 dan diagram skemanya dapat diilustrasikan dalam Gambar 1 dan 2 berikut:



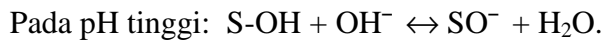
Gambar 1. Diagram skematik clay mineral lapis 2:1



Gambar 2. Struktur lapis 2 : 1

Untuk memahami proses adsorpsi, sisi-sisi aktif *clay mineral* dibedakan atas sisi muka dan sisi tepi. Kedua sisi ini merupakan permukaan eksternal. Sisi muka (disimbolkan XH) selalu memiliki muatan negatif akibat substitusi *isomorphous* Si⁴⁺ oleh Al³⁺, di mana muatan negatif satu terjadi di setiap substitusinya (Schulze, 1989). Sebaliknya sisi tepi *clay mineral* merupakan

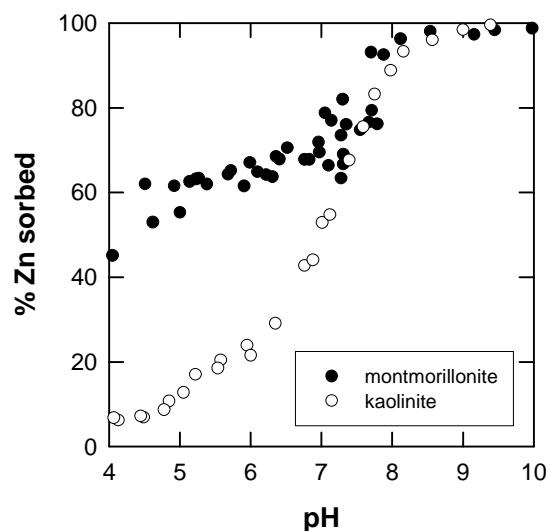
sisi yang muatannya bervariasi tergantung pada harga pH, bermuatan positif pada pH rendah dan bermuatan positif pada pH tinggi sebagai akibat protonasi dan deprotonasi grup hidroksil permukaan (S-OH) (Sposito, 1985). Reaksi protonasi dan deprotonasi S-OH dapat direpresentasikan oleh persamaan berikut:



Untuk struktur lapis 2:1, tumpukan antar unit struktur dasar mengakibatkan dekatnya letak dua atom oksigen dari lapis tetrahedral yang berdekatan, sehingga unit struktur dasar tersebut saling bertolakan (Foth dan Turk, 1972) dan mengakibatkan terciptanya satu sisi aktif ekstra yang disebut permukaan *interlayer* (permukaan internal). Adanya permukaan *interlayer* merupakan ciri khusus dari *clay mineral* dengan struktur lapis 2:1 (Sainz-Diaz *et al.*, 2001; Sposito, 1984; Borchardt, 1989; Dufrêche *et al.*, 2001).

2. Proses adsorpsi ion logam oleh *clay mineral*

Banyak faktor yang menentukan adsorpsi ion logam oleh *clay mineral*. Tipe dan sifat *clay mineral* berpengaruh secara signifikan (Sposito, 1984; Schindler *et al.*, 1987; Schulthess dan Huang, 1990; dan Spark *et al.*, 1996a,b). Jaslin *et al.* (2005) melaporkan bahwa *clay mineral* yang berbeda (montmorillonite dan kaolinite) menyerap ion logam Zn^{2+} dengan jumlah yang berbeda, seperti dapat dilihat pada gambar 3 berikut:

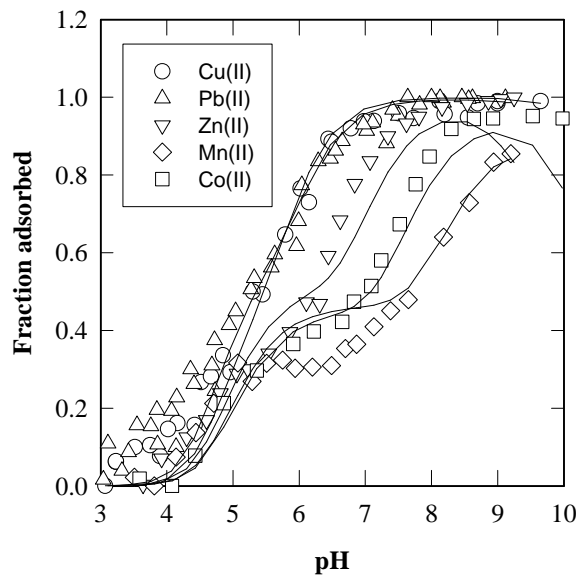


Gambar 3. Adsorpsi Zn^{2+} oleh clay mineral yang berbeda (Jaslin *et al.* 2005)

Perbedaan adsorpsi jelas terlihat pada pH yang rendah ($\text{pH} < 7$), di mana kaolinite menyerap jauh lebih sedikit daripada montmorillonite. Sedangkan pada pH yang lebih tinggi,

adsorpsi Zn^{2+} oleh kaolinite dan montmorillonite tidak berbeda secara signifikan. Perbedaan adsorpsi pada pH rendah ini mungkin ditentukan oleh perbedaan konsentrasi sisi muka (XH) kedua *clay mineral* yang sangat signifikan (Clay Mineral Society, 2005). Ditinjau dari bentuk kurvanya, dapat disimpulkan bahwa adsorpsi ion logam oleh segala *clay mineral* akan selalu meningkat jika pHnya dinaikkan. Ini disebabkan sisi tepi (S-OH) *clay mineral* bermuatan positif pada pH rendah, sehingga afinitas kation menjadi lemah akibat tolakan elektrostatis. Sebaliknya, jika pH dinaikkan, sisi tepi menjadi bermuatan negatif sehingga afinitas kation untuk sisi tersebut menjadi lebih besar.

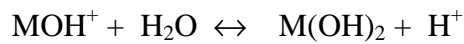
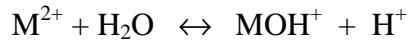
Sifat ion logam sendiri juga merupakan faktor yang sangat penting untuk menentukan perilaku adsorpsi ion tersebut. Sifat tersebut antara lain adalah hidrolisis kation (Zachara dan McKinley, 1993). pH di mana adsorpsi berlangsung tergantung pada pH di mana ion logam tersebut mulai mengalami hidrolisis, dengan kekuatan adsorpsi berbanding lurus dengan harga konstante kesetimbangan pembentukan kompleks hidroksida (MOH^{n+}) (Zachara dan McKinley, 1993). Perhatikan adsorpsi lima kation oleh kaolinite yang telah dilaporkan oleh Jaslin *et al.* (1999) berikut:



Gambar 4. Adsorpsi beberapa ion logam oleh kaolinite (Jaslin *et al.* 1999)

Range pH di mana kation mengalami adsorpsi ternyata spesifik. Jika diadakan penelitian adsorpsi dengan menggunakan satu set kation sama pada *clay mineral* yang berbeda, maka tendensi urutan adsorpsinya akan sama dengan hasil di atas. Meskipun range pH saat adsorpsi ion logam terjadi berbeda antara satu *clay mineral* dengan yang lainnya, tetapi urutan pH di mana ion logam terserap akan selalu sama.

Dapatkan kita menjelaskan mengapa adsorpsi ion logam mengikuti urutan tertentu tersebut ?. Kita perlu meninjau sifat kimia logam-logam di dalam larutan. Di dalam larutan, logam-logam tersebut mengalami serangkaian reaksi dengan air yang tergantung pada harga pH. Seperti telah disebutkan di atas bahwa reaksi tersebut adalah reaksi hidrolisis kation yang dapat dituliskan sebagai berikut:



Dalam Tabel berikut ini disajikan harga konstante kesetimbangan pembentukan MOH^+ kelima ion logam yang telah disebutkan di atas dan harga pH saat mana 50% ion-ion tersebut terserap. Ternyata terdapat hubungan yang berbanding lurus di antara keduanya.

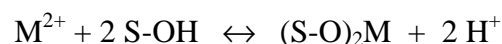
Logam	$pK(MOH^+)$ ^{a)}	$pH_{50\% ads}$
Pb^{2+}	7.71	5.3
Cu^{2+}	8.00	5.3
Zn^{2+}	8.96	6.1
Co^{2+}	9.65	6.9
Mn^{2+}	10.59	7.5

^{a)} Baes dan Mesmer, 1976.

Memang angka nominal $pK(MOH^+)$ dan $pH_{50\% ads}$ tidaklah sama, tetapi kecenderungan arahnya sama. Ini mengisyaratkan bahwa barangkali reaksi adsorpsinya menyerupai reaksi pembentukan MOH^+ . Oleh karena itu, dengan menggunakan analogi, reaksi adsorpsi yang terjadi pada *clay mineral* barangkali sebagai berikut:



Reaksi ini menunjukkan bahwa terdapat satu proton H^+ dilepas dari sisi aktif *clay mineral* untuk setiap adsorpsi ion logam. Reaksi seperti diusulkan oleh Coughlin dan Stone (1995). Ada grup penelitian lain yang membuktikan kebenaran mekanisme reaksi ini, dengan mendeteksi banyaknya proton yang dilepas untuk setiap adsorpsi ion logam. Mereka menemukan bahwa jumlah proton yang dilepaskan oleh sisi aktif *clay mineral* ternyata lebih besar dari 1 dan lebih kecil dari 2, sehingga mereka mengusulkan mekanisme reaksi lain yang dapat dituliskan sebagai berikut (Angove *et al.*, 1997; Lackovic *et al.*, 2003):

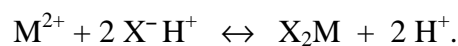


Di sini ion logam terikat oleh dua sisi aktif *clay mineral*, dan disebut ikatan *bidentate*.

Meskipun adsorpsi kelima ion logam tersebut berbeda pada pH tinggi, namun tidaklah signifikan perbedaannya pada pH rendah. Adsorpsi seng, cobalt dan mangan oleh kaolinite menunjukkan adanya plateau (sekitar 40% adsorpsi) pada pH antara 4 dan 6 (Gambar 4). Plateau adsorpsi tersebut tidak dapat ditemui jika *clay mineral* yang digunakan adalah goethite (suatu

oksida yang hanya memiliki grup aktif S-OH, dan tidak memiliki sisi muka XH). Ciri adsorpsi ion logam pada goethite lebih mirip pada adsorpsi ion logam oleh kaolinite di pH tinggi (Forbes *et al.*, 1976; Benjamin dan Leckie, 1981; Balistrieri dan Murray, 1982; Spark *et al.*, 1995a). Ini mengisyaratkan bahwa adsorpsi ion logam pada kaolinite (suatu *clay mineral* yang memiliki sisi XH dan S-OH) mencakup dua proses adsorpsi yang terpisah dan berbeda; yaitu adsorpsi pada pH tinggi yang merupakan adsorpsi pada sisi tepi S-OH, dan proses adsorpsi lainnya yang terjadi pada pH rendah.

Dapatkah kita menentukan proses adsorpsi tambahan yang terjadi pada kaolinite di pH rendah tersebut ?. Kenyataan di mana kurva adsorpsi pada pH rendah untuk seng, cobalt dan mangan tidak berbeda meskipun sifat hidrolisisnya berbeda menunjukkan bahwa sifat adsorpsi di pH rendah tidak bergantung pada sifat ion logam. Karena ion-ion tersebut bermuatan dua, maka kemampuannya untuk menggantikan kation bermuatan satu yang terikat oleh sisi muka *clay mineral* sangat besar. Oleh karena itu, karakterisasi adsorpsi ini dapat dijelaskan dengan reaksi pergantian muatan atau disebut juga mekanisme reaksi pertukaran ion. Reaksi ini sangat mungkin terjadi karena sisi muka *clay mineral* bermuatan negatif akibat substitusi *isomorphous*. Karena pada umumnya di dalam bentuk larutan, muatan negatif ini mengikat kation seperti H^+ , K^+ atau Na^+ yang biasanya berasal dari elektrolit yang digunakan, maka sisi muka *clay mineral* dapat disimbolkan XH, sehingga reaksi pertukaran ionnya dapat dituliskan sebagai berikut:



Seperti yang telah diketahui bahwa pH merupakan ukuran konsentrasi ion H^+ di mana pH yang lebih tinggi menandakan konsentrasi H^+ yang lebih rendah. Jika pH larutan dinaikkan, maka ion H^+ yang ada lebih sedikit dan X^- mempunyai afinitas yang lebih tinggi terhadap kation lain. Dengan demikian, ion bermuatan dua akan lebih besar kemungkinannya untuk terikat pada sisi aktif X^- tersebut.

Karena adsorpsi melalui mekanisme ini bergantung pada jumlah muatan ion, maka ion logam yang memiliki muatan sama, akan mulai terserap oleh *clay mineral* pada pH yang hampir sama. Selain itu, jumlah muatan negatif yang terdapat pada sisi muka XH akan menentukan jumlah maksimum logam yang terserap melalui proses ini. Inilah alasan mengapa plateau adsorpsi untuk adsorpsi ion logam oleh kaolinite (Gambar 4) besarnya hampir sama, yaitu 40%.

Namun, pandangan sepintas pada Gambar 4 akan memunculkan suatu pemikiran bahwa proses ini tidak terjadi pada adsorpsi ion logam tembaga dan timbal karena tidak terlihat munculnya plateau pada adsorpsi ion logam ini. Pada kenyataannya tidak demikian. Adsorpsi ion tembaga dan timbal pada sisi tepi S-OH terjadi pada pH yang jauh lebih rendah dari pada ion

yang lainnya, sehingga kedua proses adsorpsi di dua sisi aktif terjadi pada range pH yang sama. Sebagai konsekuensinya, kedua proses adsorpsi tersebut sulit dibedakan.

Bagaimana mekanisme reaksi adsorpsi pada sisi muka XH ini dapat dikonfirmasi kebenarannya?. Jika reaksi pertukaran ion ini benar, maka penambahan kation lain akan mengurangi jumlah adsorpsi ion logam. Spark *et al.* (1995b) menambahkan kation Na^+ dengan berbagai konsentrasi pada adsorpsi ion logam oleh kaolinite. Semakin tinggi konsentrasi kation Na^+ yang ditambahkan semakin besar pengaruhnya pada adsorpsi ion logam.

Penambahan ion Na^+ telah dibuktikan tidak berpengaruh pada adsorpsi ion logam oleh sisi tepi S-OH *clay mineral*. Ini dianalogikan dari adsorpsi ion logam pada goethite yang tidak dipengaruhi oleh penambahan ion Na^+ (Spark *et al.*, 1995a).

Karena mekanisme reaksinya adalah reaksi pertukaran ion, maka KPK (Kapasitas Pertukaran Kation) yang dimiliki *clay mineral* sangat menentukan karakteristik adsorpsi ion logam. KPK ini merupakan alasan mengapa prosentase ion logam yang terserap oleh montmorillonite jauh lebih besar dibandingkan oleh kaolinite pada pH di bawah 7 (Gambar 3). Tatkala dua *clay mineral* yang menyerap ion logam secara berbeda tersebut dinormalisasi sedemikian rupa supaya KPK-nya hampir sama, ternyata adsorpsi ion logamnya menjadi sama pula (Jaslin *et al.*, 2005). Ini juga merupakan konfirmasi akan kebenaran reaksi pertukaran ion yang telah diusulkan.

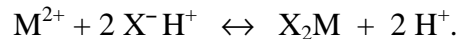
Untuk *clay mineral* yang mempunyai struktur lapis 2:1 (e.g. montmorillonite), terdapat permukaan interlayer yang berperan sangat vital (sebagaimana layaknya sisi muka XH) di dalam proses adsorpsi ion logam (Stadler dan Schindler, 1993; Brigatti *et al.*, 1999). Namun, kinetika adsorpsi yang berlangsung sangat cepat pada adsorpsi ion seng oleh montmorillonite menunjukkan bahwa sebagian besar ion logam terikat pada sisi eksternal montmorillonite (sisi muka dan tepi) (Jaslin *et al.*, 2005) karena adsorpsi pada permukaan interlayer biasanya ditandai dengan kinetika adsorpsi yang sangat lambat.

Modeling dengan menggunakan suatu program komputer telah dilaksanakan untuk menjelaskan proses adsorpsi, termasuk di dalamnya proses adsorpsi ion logam oleh *clay mineral*. Modeling mengkonfirmasi bahwa proses adsorpsi terjadi melalui dua reaksi yang telah diusulkan di atas. Pembentukan kompleks melalui reaksi tersebut terjadi di bidang- β permukaan *clay mineral*, sehingga kompleks yang terjadi disebut kompleks *inner-sphere* (Angove *et al.*, 1997; Jaslin *et al.*, 1999; Lackovic *et al.*, 2003; Jaslin *et al.*, 2005).

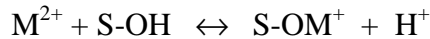
C. Penutup

Adsorpsi ion logam oleh *clay mineral* umumnya terjadi melalui dua reaksi. Pertama, pembentukan kompleks *inner-sphere* antara ion logam dan sisi muka XH dan *interlayer* (bagi

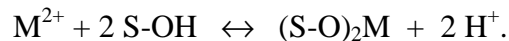
clay mineral dengan struktur lapis 2:1) melalui reaksi pertukaran ion. Reaksinya dapat dituliskan sebagai berikut:



Kedua, pembentukan kompleks *inner-sphere* antara ion logam dengan sisi tepi (S-OH), melalui reaksi sebagai berikut:



atau



D. Daftar Pustaka

- Angove, M. J., Johnson, B. B., dan Wells, J. D., *Adsorption of Cadmium(II) on Kaolinite*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 1997, **126**, 137.
- Baes, C. F. dan Mesmer, R. E., *The Hydrolysis of Cations*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
- Balistreri, L. S. dan Murray, J. W., *The Adsorption of Cu, Pb, Zn, and Cd on Goethite from Major Ion Seawater*, Geochimica et Cosmochimica Acta, 1982, 46, 1253.
- Benjamin, M. M. dan Leckie, J. O., *Multiple-Site Adsorption of Cd, Cu, Zn, and Pb on Amorphous Iron Oxyhydroxide*, Journal of Colloid and Interface Science, 1981, 79, 46, 209.
- Borchardt, G., in *Minerals in Soil Environments*, (J.B. Dixon and S.B. Weed, eds.), Madison, Winconsin: Soil Science Society of America, 1989, 675.
- Brigatti, M. F., Lugli, L., Montorsi, S. dan Poppi, L., *Effects of Exchange cations and Layer Charge Location on Cysteine Retention by Smectites*, Clays and Clay Minerals, 1999, **47**, 664.
- Brindley, G. W. dan Brown, G. (eds.), *Crystal Structures of Clay Minerals and their X-Ray Identification*, Mineralogical Society Monograph No. 5, Mineralogical Society, London, 1984.
- Clay Mineral Society, <http://cms.lanl.gov/sourceclays.htm>, (diakses tanggal 20 Januari 2005).
- Coughlin, B. R. dan Stone, A. T., *Nonreversible Adsorption of Divalent Metal Ions (Mn^{II}, Co^{II}, Ni^{II}, Cu^{II}, and Pb^{II}) onto Goethite: Effect of Acidification, Fe^{II} Addition, and Picolinic Acid Addition*, Environmental Science and Technology, 1995, **29**, 2445-2455.
- Dufrêche, J.-F., Marry, V., Bernard, O., dan Turq, P., *Models for Electrokinetic Phenomena in Montmorillonite*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2001, **195**, 171.
- Forbes, E. A., Posner, A. M. dan Quirk, J. P., *The Specific Adsorption of Divalent Cd, Co, Cu, Pb, and Zn to Goethite*, Journal of Soil Science, 1976, 27, 154.
- Foth, H. D., and dan Turk, L. M., *Fundamental of Soil Science*, 5th ed., Canada: John Wiley and Sons, 1972, 162.
- Jaslin I., Wells, J. D., Johnson, B. B., dan Angove, M. J., *A Comparative Study of the Adsorption of Transition Metals on Kaolinite*, Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 217, 403-410.
- Jaslin I., Wells, J. D., Johnson, B. B., dan Angove, M. J., *Surface Complexation Modeling of the Sorption of Zn(II) by Montmorillonite*, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, **252**, 33.

- Lackovic, K., Angove, M. J., Johnson, B. B., dan Wells, J. D., *Modeling the Adsorption of Cd(II) onto Muloorina Illite and Related Clay Minerals*, Journal of Colloid and Interface Science, 2003, **257**, 31.
- Sainz-Diaz, C. I., Hernandez-Laguna, A., dan Dove, M. T., *Modeling of Dioctahedral 2:1 Phyllosilicates by Means of Transferable Empirical Potentials*, Physical Chemistry and Mineralogy, 2001, **28**, 130.
- Schindler, P. W., Lietchi, P, dan Westall, J. C., *Adsorption of Copper, Cadmium and Lead from Aquous Solution to the Kaolinite/Water interface*, Netherlands Journal of Agricultural Science, 1987, **35**, 219.
- Schulze, D. J., in *Minerals in Soil Environments*, (J.B. Dixon and S.B. Weed, eds.), Madison, Winconsin: Soil Science Society of America, 1989, 1.
- Schulthess, C. P., dan Huang, C. P., *Adsorption of Heavy Metals by silicon and Aluminum Oxide Surfaces on Clay Minerals*, Soil Science Society of America Journal, 1990, 54, 679.
- Spark, K. M., Wells, J. D., dan Johnson, B. B., *Characterizing Heavy Metal Adsorption on Oxides and Oxyhydroxides*, European Journal of Soil Science, 1995a, **46**, 621.
- Spark, K. M., Wells, J. D., dan Johnson, B. B., *Characterizing Trace Metal Adsorption on Kaolinite*, *European Journal of Soil Science*, 1995b, **46**, 633.
- Sposito, G., *The Surface Chemistry of Soils*, New York: Oxford University Press, 1984.
- Stadler, M. dan Schindler, P. W., *The Effect of Dissolved Ligands Upon the Sorption of Cu(II) by Ca-Montmorillonite*, Clays and Clay Minerals, 1993, **41**, 680.
- Zachara, J. M. dan McKinley, J. P., *Influence of Hydrolysis on the Sorption of Metal Cations by Smectites: Importance of Edge Coordination Reactions*, Aquatic Science, 1993, **55**, 250.