

SORPSI NEODIMIUM SEBAGAI ANALOG AKTINIDA PADA KALSIT

*Pratomo Budiman Sastrowardoyo

**Jean-Claude Rouchaud, Michel Fedoroff

*Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Atom Nasional

**CNRS - CECM, France

ABSTRAK

SORPSI NEODIMIUM SEBAGAI ANALOG AKTINIDA PADA KALSIT. Telah dilakukan studi sorpsi neodimium pada kalsit, terutama dalam rangka peramalan evolusi bahan radioaktif dalam formasi geologi tanah dalam, khususnya setelah terjadi kerusakan wadah limbah dan pelarutan radionuklida dalam air tanah. Neodimium bertanda Nd-147 digunakan untuk mensimulasi aktinida bervalensi 3, sementara kalsit merupakan model mineral ubahan batuan granitik. Dalam suatu medium sederhana, air murni, tampak sorpsi neodimium dengan suatu afinitas besar. Kinetika sorpsi yang cepat, serta koefisien distribusi dan kapasitas sorpsi yang tinggi, merupakan faktor favorabel bagi retensi migrasi radionuklida dalam air tanah. Sorpsi tersebut nampaknya irreversibel dan kemungkinan merupakan sorpsi permukaan, dengan afinitas *site* sorpsi serbaneka. Suatu kinetika tahap kedua diamati, dengan suatu kapasitas lebih tinggi. Isoterm Freundlich dapat digunakan untuk peramalan retensi radioelemen sebagai fungsi konsentrasi yang setelah dibandingkan dengan hasil-hasil metode dinamik, studi-studi di lapangan maupun analog natural, data yang diperoleh dapat disusun ke dalam suatu model migrasi.

ABSTRACT

SORPTION OF NEODYMIUM AS ANALOGUE OF ACTINIDES ON CALSITE. The sorption of Neodymium on the calsite and its contribution in predicting the sorption of radionuclides on minerals within deep geological formation, especially after the rupture of the container and the release of the radionuclides into underground water has been studied. Neodymium labelled by Nd-147 was used as an analogue of trivalent actinides, while calcite was used as a sample of altered minerals of granitic rocks. In a simple aqueous media, neodymium is retained with a high affinity. Fast kinetics of fixation, high distribution coefficients and sorption capacity are favourable factors for slowing down of radionuclides migration in underground water. The fixation is quasi-irreversible, and probably a superficial sorption, with heterogenous affinity for sorption sites. A second kinetic step was observed, leading to increase of the retention capacity. The Freundlich isotherm observed can be used for predicting the retention of radioelements as a function of their concentration, and after comparison with the result of dynamic method, field experiments and natural analogues, these data met a migration model.

PENDAHULUAN

Solusi yang banyak diterima untuk pemecahan masalah limbah radioaktif berumur panjang dan beraktivitas tinggi ialah penyimpanan dalam formasi geologi tanah dalam [1,2]. Mayoritas argumentasi yang mendukung, bahwa elemen batuan itu sendiri dapat bertindak sebagai barrier terhadap penyebaran radionuklida ke biosfir, setelah suatu perioda pengungkungan. Barrier buatan tersebut berupa immobilisasi dengan bahan matriks limbah, wadah non-korosif serta bahan penyangga. Selanjutnya air tanah mengambil peran dengan melarutkan radionuklida dan mentransportasikan nya menuju biosfir. Dengan demikian formasi

geologi merupakan barrier fundamental terhadap migrasinya radionuklida, yang setelah suatu perioda ribuan tahun terutama berupa aktinida pemancar α [3].

Untuk evaluasi jangka panjang, perlu dipelajari efisiensi barrier geologi tersebut. Karenanya, diperlukan adanya "bank data" tentang kelakuan radionuklida di geosfir. Di antara beberapa jenis tapak penyimpanan, formasi batuan granit merupakan bahan pembicaraan dalam makalah ini.

Pada pemilihan setiap tapak penyimpanan potensial, suatu parameter penting ialah retensi migrasi radionuklida secara sorpsi oleh

batuan yang dilaluinya. Pengertian sorpsi dalam hal ini, mencakup semua proses *transfert* spesi-spesi terlarut, dari fase larutan ke fase padatan, secara fisika maupun kimia, *reversibel* atau *irreversibel* [4]. Proses sorpsi dapat dipelajari dengan metode statik (pengocokan sederhana), metode dinamik dengan kolom di laboratorium, studi-studi di lapangan maupun analog natural.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk maksud tersebut yang sebagian telah dirangkum dalam sebuah laporan teknik [4]. Namun dalam beberapa hal perlu penyempurnaan, karena :

- Umumnya digunakan gerusan batuan granitik yang memberikan hasil global dan tidak memungkinkan pemahaman tentang mekanisme sorpsi maupun pengaruh masing-masing individu *konstitutif* batuan granitik.
- Dilakukan pada rentang konsentrasi terbatas, sementara proses sorpsi bergantung pada konsentrasi.
- Beberapa aspek belum dipelajari seperti kinetika sorpsi, reversibilitas sorpsi, maupun pengaruh komposisi dalam larutan (pH, pengaruh ion-ion, pengkompleks dsb.).

Di CNRS-CECM Vitry Perancis, telah dilakukan studi sorpsi pada mineral-mineral individu: mineral ubahan, kalsit dan smektit [5,7], dan mineral primer granitik, ortoklas [6,7]. Studi dengan mineral ubahan dilakukan karena mineral-mineral tersebut merupakan konstitutif utama pengisi *fracture* batuan granit, jalur alir *privileged* bagi air tanah. Karenanya, radionuklida-radionuklida akan berkemungkinan lebih besar untuk berkontak dengan mineral-mineral tersebut. Atas pertimbangan keselamatan, untuk menghindari bekerja langsung dengan aktinida pemancar α , pada tahap awal digunakan unsur model, unsur dengan sifat-sifat yang mirip terhadap aktinida. Dalam hal ini digunakan lantanida, yaitu neodimium bertanda ^{147}Nd , untuk mensimulasi aktinida bervalensi 3.

Kemiripan sifat lantanida dengan aktinida telah banyak dikenal [8]. Studi-studi lain berkaitan dengan program analisis keselamatan ini di antaranya ; sorpsi Cs pada sedimen oleh Lieser et al. [9], sorpsi Eu pada smektit (jenis monmorilonit oleh Meyer et al. [10], dll.

Dalam makalah ini disajikan sorpsi neodimium pada kalsit, dengan metode statik: kontak fase padatan secara pengocokan dengan larutan mengandung unsur yang dipelajari. Ku-

antifikasi sorpsi dilakukan dengan menghitung koefisien distribusi. Pengukuran-pengukuran dimulai dengan kondisi paling "elementer" yaitu penggunaan medium sederhana (air murni) untuk studi kinetika, isoterm dan reversibilitas sorpsi. Pengocokan dilakukan pada suhu $50 \pm 2^\circ\text{C}$, untuk mensimulasi penyebaran panas yang kemungkinan akan timbul akibat aksi pancaran α dalam lingkungan batuan.

Kalsit dipilih sebagai bahan percobaan karena merupakan salah satu mineral dengan kelimpahan paling besar, sementara informasi-informasi tentang sorpsi pada mineral ini belum banyak dikenal [11]. Untuk program analisis keselamatan yang sama beberapa studi lain dengan kalsit telah dilakukan [11 sd.13].

Diharapkan data yang diperoleh dapat disumbangkan untuk pengayaan "bank data" yang setelah dibandingkan dengan hasil-hasil metode dinamik di laboratorium, studi-studi di lapangan maupun analog natural, dapat dipublikasikan dalam model-model migrasi radionuklida. Kemudian model tersebut diharapkan akan merupakan rekomendasi dalam pemilihan tapak penyimpanan yang sesuai.

TATA KERJA

Sebelum pengukuran sorpsi dilaksanakan, kuantitas unsur terserap oleh peralatan yang digunakan, perlu dilakukan. Studi pendahuluan yang berkaitan telah dilakukan untuk memilih jenis bahan bejana pengocokan yang sesuai [7]. Bejana polietilen tipe HD (high density) memperlihatkan daya sorpsi rendah dan dipilih untuk studi ini.

Penyediaan bahan-bahan.

Cara penyediaan fase padatan kalsit maupun perunut radioaktif ^{147}Nd ($T_{1/2} = 11,06$ hari) telah disampaikan dalam pustaka terdahulu [7]. Karakteristik terhadap gerusan kalsit berukuran $25-71 \mu\text{m}$ (dan $40-80 \mu\text{m}$) dilakukan dengan pengamatan pada mikroskop optik maupun mikroskop elektronik (SEM); pengukuran luas permukaan spesifik, geometri maupun secara BET; serta analisis pengaktipan neutron.

Pelarutan logam neodimium yang telah diiradiasi dilakukan dengan sekecil mungkin volume HNO_3 pekat. Setelah pengenceran dengan aquadest diperoleh larutan sediaan perunut. Larutan pengemban neodimium dibuat dengan cara pelarutan yang sama.

Teknik pengocokan sederhana

Percobaan dilakukan dengan pengontakan gerusan kalsit dengan neodimium dalam

larutan, pada ratio 0,1 g padatan dan 15 ml larutan. Waktu pengocokan dilaksanakan antara 10 menit sampai beberapa minggu untuk studi kinetika, kemudian variasi konsentrasi neodimium dilakukan pada 10^{-7} hingga 10^{-5} M untuk untuk studi isoterm dan reversibilitas sorpsi.

Setelah pemisahan fase padatan-larutan secara sentrifuga radioaktifitas ^{147}Nd dalam larutan diukur dengan bantuan detektor NaI(Tl) atau GeLi pada energi γ 91,1 dan 531 KeV. Dengan memperhitungkan waktu paruh dan peluruhannya, radioaktifitas dinyatakan pada satu acuan waktu (t_0) yang sama.

Koefisien distribusi

Kuantifikasi sorpsi dilakukan dengan pengukuran koefisien distribusi (K_d), ratio konsentrasi neodimium tersorpsi pada kalsit, C_s , dan dalam larutan, C_l , dalam keadaan kesetimbangan :

$$K_d = \frac{C_s}{C_l}$$

Dalam hal penggunaan radioaktifitas, yang sebanding dengan kwantitas unsur, koefisien distribusi diberikan oleh [4]:

$$K_d = \frac{v}{m} \frac{(A_0 - A)}{A}$$

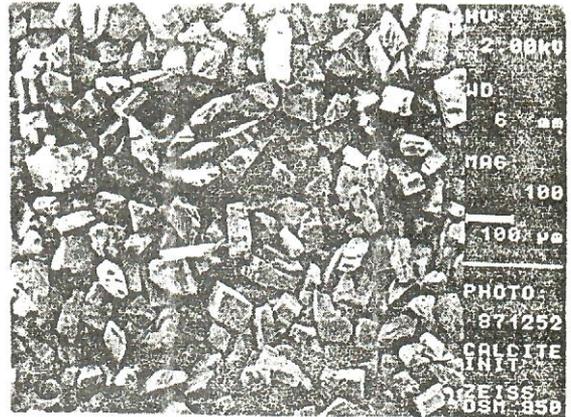
dimana v dan m masing-masing volume larutan dan berat padatan sedangkan A_0 dan A radioaktifitas fase larutan sebelum dan setelah pengocokan. Koefisien distribusi, k_d , seringkali dinyatakan dalam satuan L/kg. Dengan memperhitungkan luas permukaan spesifik padatan, k_d dapat dinyatakan dalam satuan L/m^2 .

HASIL DAN PEMBAHASAN

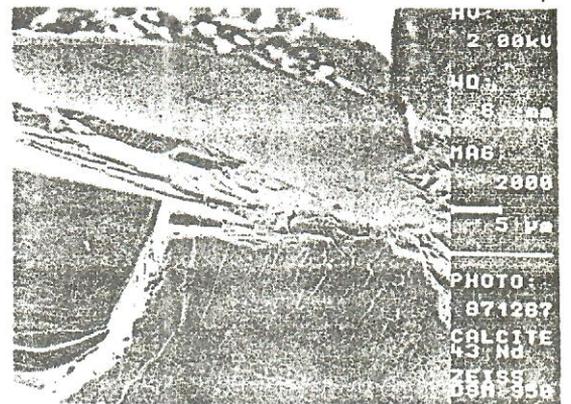
Karakterisasi padatan

Pengamatan gerusan kalsit dengan mikroskop optik memperlihatkan bentuk kristal yang umumnya berpermukaan datar. Namun dari penyidikan dengan mikroskop elektronik, SEM (Gambar 1), tampak adanya cacat pada permukaan kristal. Hal ini dapat dijelaskan dari data pengukuran luas permukaan geometri $0,03 \text{ m}^2/\text{g}$ yang jauh lebih kecil dibandingkan pengukuran secara BET, $0,20 \text{ m}^2/\text{g}$. Hasil analisis dengan pengaktifan neutron menunjukkan konsentrasi kalsium 42%, yang mendekati perhitungan secara teori. Diperlihatkan pula kandungan unsur-unsur minor, pada orde konsen-

a).



b).



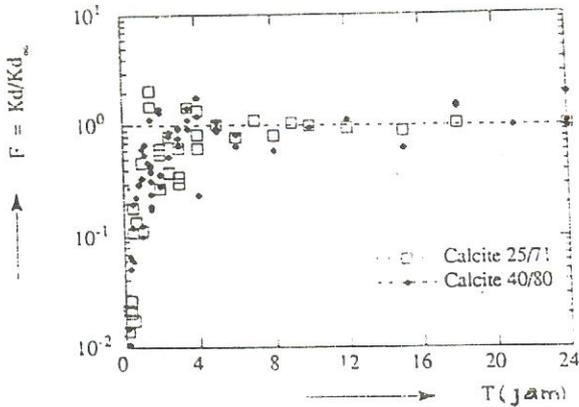
Gambar 1. Mikrografi elektronik kristal kalsit (SEM); ukuran partikel 25/71 µm.

trasi antara 0,002-80 ug/g : As, Au, Co, Cs, K, Na, Pt, Rb, Sb, Sc dan Sr.

Kinetika sorpsi

Pengertian medium sederhana air murni, dimaksudkan untuk kondisi medium dengan sekecil mungkin mengandung bahan yang diperlukan untuk melarutkan neodimium. Larutan dengan 1 ug/L neodimium mengandung 11 mmol/L ion-ion nitrat.

Percobaan kinetika sorpsi dilakukan untuk memilih waktu pengocokan yang cukup dicapainya kesetimbangan, dengan konsentrasi awal neodimium 40 µeq/L. Pada Gambar 2 disajikan besaran F , ratio koefisien distribusi pada tiap pengukuran dan pada keadaan kesetimbangan, sebagai fungsi waktu pengocokan. Harga K_d naik diikuti suatu dataran mulai 4 jam pengocokan. Awal dicapainya dataran ini diambil sebagai waktu pengocokan pada percobaan selanjutnya.



Gambar 2. Kinetika sorpsi neodimium pada kalsit. Variasi koefisien distribusi ($F = Kd/Kd_{\infty}$) sebagai fungsi waktu kontak, pada konsentrasi awal neodimium $40 \mu\text{eq/L}$.

Tampak adanya dispersi harga-harga Kd pada awal pengocokan, yang berkurang saat dataran dicapai. Analisis yang dilakukan pada fase larutan memperlihatkan adanya pelarutan kalsit pada konsentrasi kalsium sekitar $1 \cdot 10^{-3} \text{ eq/L}$, yang mendekati hasil perhitungan berdasarkan kelarutan kalsit [5]. Kemungkinan, hal tersebut merupakan penyebab terdispersinya harga-harga Kd .

Isoterm sorpsi

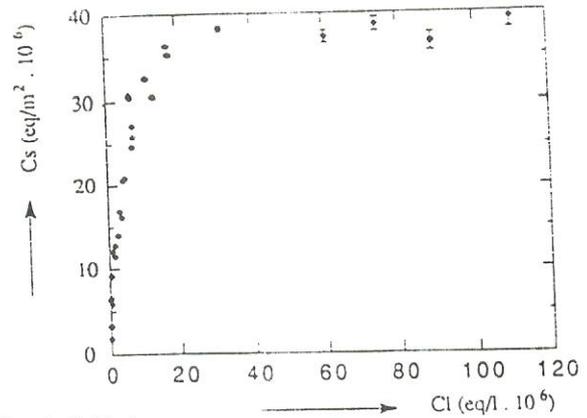
Percobaan dilakukan dengan waktu pengocokan 4 jam. Hasil-hasil dirangkum pada Gambar 3. Tampak konsentrasi neodimium tersorpsi pada kalsit, C_s , naik secara progresif sebagai fungsi konsentrasi dalam larutan pada kesetimbangan, C_l , hingga dicapai suatu batas maksimum terdefinisi sebagai "dataran", yang diambil sebagai kapasitas sorpsi, dan diperoleh $C_a = 38,0 \pm 1,1 \mu\text{eq/m}^2$. Penyajian dalam bentuk logaritmik, variasi C_s linier terhadap C_l , menyatakan isoterm sorpsi mengikuti suatu hukum Freundlich, dengan suatu tetapan $n < 1$. Dapat dijelaskan bahwa afinitas sorpsi neodimium pada kalsit tidak serbasama [4]. Secara matematis aturan Freundlich dapat ditulis sebagai [5,7,14]

$$C_s = C_a (K \cdot C_l)^n$$

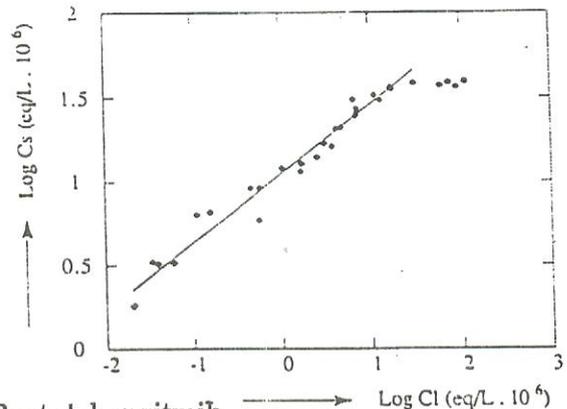
atau dalam bentuk logaritmik:

$$\log C_s = \log C_a + n \cdot \log K + n \cdot \log C_l$$

dimana C_a dan K masing-masing merupakan kapasitas dan tetapan kesetimbangan sorpsi. Hasil pengukuran kemiringan diperoleh $n = 0,41$. Penentuan pada ordinat dan dengan menggunakan harga C_a di atas, diperoleh tetapan kesetimbangan $K = 5,1 \cdot 10^4 \text{ L/eq}$. Diper-



a). Bentuk linier



b). Bentuk logaritmik

Gambar 3. Isoterm sorpsi neodimium pada kalsit. Variasi konsentrasi neodimium tersorpsi pada kalsit, $C_s =$ fungsi konsentrasi dalam larutan pada kesetimbangan, C_l .

- a). Bentuk linier
- b). Bentuk logaritmik

oleh pula suatu koefisien distribusi yang tinggi $k_d = 11 \text{ L/m}^2$ untuk konsentrasi neodimium rendah sekitar $1 \mu\text{eq/L}$. Hal ini menunjukkan afinitas sorpsi yang tinggi.

Dari pengukuran luas permukaan spesifik fase padatan secara BET dapat dihitung "angka pelapisan" oleh spesi tersorpsi: Kapasitas $38 \mu\text{eq/m}^2$ setara dengan $7,6 \cdot 10^{18} \text{ atom/m}^2$. Dengan pengandaian spesi tersorpsi sebagai kation Nd^{3+} (jari-jari $0,108 \text{ nm}$ [15]), diperoleh "angka pelapisan" sebesar $0,27$. Hasil perhitungan, menunjukkan jarak antar kation tersorpsi sebesar $0,4 \text{ nm}$, relatif lebih kecil dibandingkan par meter kristal kalsit $0,626 \text{ nm}$ [15]. Kemungkinan hal tersebut yang menyebabkan isoterm sorpsi mengikuti suatu aturan Freundlich, dengan afinitas sorpsi serbaneka dan menurun terhadap proses pelapisan. Dapat dinyatakan pula dengan angka pelapisan tersebut, kapasitas sorpsi neodimium pada kalsit cukup

tinggi. Pengamatan dengan mikroskop elektron pada gerusan kalsit yang telah dikontakkan dengan neodimium memperlihatkan tidak terdeteksinya neodimium, yang diinterpretasikan bahwa proses sorpsi terjadi secara merata pada permukaan kalsit.

Kinetika jangka panjang

Pada percobaan yang dibahas di atas, hanya diperoleh satu dataran sorpsi antara 4 dan 24 jam pengocokan. Pengamatan dilanjutkan dengan pengocokan lebih lama, untuk melihat bila terdapat kemungkinan adanya evolusi jangka panjang. Pada pengocokan selama 30 hari dengan konsentrasi awal neodimium 140µeg/L, diberikan suatu harga Ca dan Kd yang tinggi (99,0 ± 0,01 ueq/m² dan 158 ± 3,8 L/m²), sementara biasanya harga Kd rendah dengan kenaikan Cs. Kemungkinan, penjeñuhan sorpsi pada waktu pengocokan pendek belum dicapai, dan terdapat suatu kinetika tahap kedua yang lebih lama. Beberapa penjelasan dapat diajukan diantaranya modifikasi lambat pada permukaan fase padatan dari suatu fenomena adsorpsi (tahap pertama), ke suatu fenomena kopresipitasi atau pembentukan suatu fase baru atau fenomena difusi (tahap kedua).

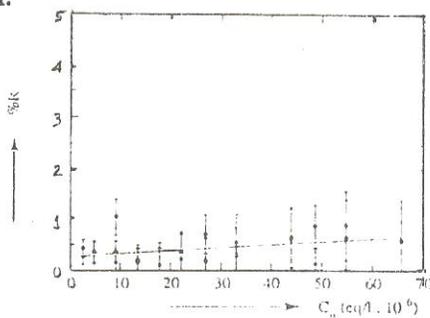
Untuk sementara tidak ditinjau kemungkinan adanya hipotesa lain.

Reversibilitas

Dilaksanakan dengan pengocokan aquadest dengan fase padatan yang telah diperlakukan dengan neodimium. Kuantitas desorpsi dinyatakan dengan proses reversibilitas, %R:

$$\% R = \frac{(C_s - C_s')}{C_s} \times 100\%$$

dengan Cs dan Cs' ialah konsentrasi neodimium pada fase padatan pada kesetimbangan, masing-masing untuk proses adsorpsi dan desorpsi.



Gambar 4. Reversibilitas sorpsi neodimium pada kalsit. Variasi % desorpsi, % R; sebagai fungsi konsentrasi awal neodimium dalam larutan.

Gambar 4 memperlihatkan % R demikian rendah, di bawah 1 % sebagai fungsi konsentrasi awal neodimium, tanpa variasi nyata. Faktor ini sangat favorabel bagi retensi migrasi radioisotop dalam lingkungan geologi.

PEMBAHASAN UMUM

Untuk menguji kebenaran data yang diperoleh, idealnya harus dibandingkan dengan studi di lapangan. Namun data lapangan tersebut umumnya sangat kompleks. Karena itu biasanya dilakukan perbandingan hasil antar laboratorium, walaupun masih akan dijumpai kesulitan-kesulitan disebabkan karakteristik data berbeda-beda, karena kondisi-kondisi percobaan, penggunaan satuan-satuan yang digunakan, dll.

Data sorpsi pada mineral lain : smektit, jenis nontronit, contoh lain mineral ubahan batuan granitik bersifat lempung. Diperlihatkan bahwa pada kondisi-kondisi percobaan yang sama, sorpsi neodimium juga mengikuti suatu aturan Freundlich, namun dengan mekanisme penukaran ion antara neodimium dalam larutan dengan ion-ion *exchangeable* pada smektit [5]. Diperoleh pula suatu kapasitas sorpsi lebih besar, Ca = 0,288 eq/kg dan koefisien distribusi untuk konsentrasi rendah dalam larutan pada kesetimbangan, Kd 91 ueq/l = 4,212 10⁴L/kg.

Hasil yang menarik sebagai bahan bandingan : isoterm sorpsi neodimium pada ortoklas dalam medium yang sama mengikuti suatu aturan Langmuir, afinitas sorpsi serbasama [6,7], dengan model persamaan [4]:

$$\frac{1}{K_d} = \frac{C_l}{C_s} = \frac{1}{(K \cdot C_a)} + \frac{C_l}{C_a}$$

Dari kapasitas 1,1x10¹⁸ atom/m², diperoleh faktor pelapisan sebesar 0,04 jarak antar kation tersorpsi sebesar 1 nm relatif lebih besar terhadap jari-jari ion Nd³⁺, namun berorde sama dengan parameter kristal ortokals (a = 0,84; b = 1,29; c = 0,71) [15].

Kapasitas sorpsi pada kalsit lebih besar dari pada ortoklas, memberikan ide bahwa mineral ubahan memiliki potensi yang lebih tinggi untuk menahan migrasi radionuklida, dari pada mineral asal. Demikian tepatlah studi dengan mineral ubahan ini.

Suatu pengamatan pada permukaan gerusan kalsit dengan Hamburan Balik Rutherford (RBS) oleh Dran dkk. Di CSNSM IN2P3 Orsay- Perancis [16], diperlihatkan suatu kapasitas sorpsi pada orde yang sama,

yaitu $1,3 \times 10^{19}$ atom/m². Mengingat hasil pengamatan pada SEM, maka kemungkinan proses sorpsi neodimium pada kalsit yang terjadi merupakan suatu fenomena permukaan, adsorpsi.

Dari perhitungan spesiasi [5], berdasarkan tetapan-tetapan kesetimbangan reaksi yang mungkin untuk neodimium pada kondisi-kondisi percobaan [17 s/d 21], ditunjukkan bahwa kompleks NdCO_3^+ dan $\text{Nd}(\text{CO}_3)_2^-$ merupakan spesi-spesi dominan dalam larutan. Jadi kemungkinan neodimium teradsorpsi pada permukaan kalsit sebagai spesi-spesi tersebut.

Untuk dapat diaplikasikan dalam model migrasi, data yang diperoleh dengan metode ini perlu dibandingkan dengan hasil metode lain; metode dinamik di laboratorium, studi-studi di lapangan, maupun analog natural.

KESIMPULAN

Sorpsi neodimium pada kalsit, memperlihatkan kinetika relatif cepat, serta kapasitas sorpsi dan koefisien distribusi yang tinggi dengan suatu proses "kwasi-irreversibel". Kemungkinan proses yang terjadi merupakan fenomena permukaan dengan spesi teradsorpsi NdCO_3^+ dan $\text{Nd}(\text{CO}_3)_2^-$, pada "site sorpsi" serbaneka.

Adanya kinetika tahap kedua dengan suatu kapasitas dan suatu koefisien distribusi yang

lebih tinggi, yang memperlihatkan adanya peningkatan kuantita unsur teradsorpsi, merupakan faktor favorabel tambahan bagi retensi migrasi radioelemen di geosfir.

Dengan metode pengocokan sederhana, telah diperoleh data baru dan penting tentang sorpsi pada bahan alami, yang dapat disumbangkan untuk pengayaan "bank data" tentang kelakuan radionuklida di geosfir. Selanjutnya setelah dibandingkan dengan data metode lain: metode dinamik dengan kolom di laboratorium, studi-studi di lapangan maupun analog natural, hasil ini dapat diaplikasikan dalam model-model migrasi untuk tujuan evaluasi penyimpanan limbah radioaktif.

Kelanjutan studi ini, ialah mempelajari pengaruh komposisi dalam larutan, pengompleks anorganik maupun organik, serta penggunaan air tanah buatan maupun alami. Perlu dilakukan pula: melanjutkan studi pada kinetika tahap kedua; studi dengan aktinida yang secara riil akan ditemukan; studi dengan mineral-mineral lain dan mempelajari pengaruh kompetisi mineral-mineral konstitutif batuan granit.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ditujukan kepada Mr. Jean-Claude Dran, Peneliti Pembina di CSNSM- IN2P3 Orsay Perancis, atas informasi tentang tentang hasil penelitiannya.

DAFTAR PUSTAKA

1. N.A. Chapman, I.G. McKinley: "The geological disposal of nuclear waste", John Wiley and Sons, Inc., New York (1987).
2. NEA: "Geological disposal of radioactive waste", OECD Paris (1984).
3. B.S. Jensen: "Migration phenomena of radionuclide into the geosphere", Harwood Acad. Publ. Chur. (1982).
4. I.G. McKinley, J. Hadermann: "Radionuclide Sorption Data Base for Swiss Safety Assessment", NAGRA-CEDRA, TR 84-40, Wurenlingen- Switzerland (1985).
5. P. Budiman Satrowardoyo, Disertasi Doktor, Universitas Paris XI (1991).
6. M.O. Mecheri, Disertasi Doktor, University paris VI (1991).
7. M.O. Mecheri, P. Budiman Satrowardoyo, J.C. Rouchaud, M. Fedoroff, Radiochim. Acta, 50, 169 (1990).
8. J. Champion: "Chimis des actinides", in Genie Nucleaire, Mecanique et Chaleur, B-8-II, Technique de l'Ingenieur, Paris (1989), 3520.
9. K.H. Lieser, Th. Steinkoffp, Radiochim, Acta, 48, 79 (1989).
10. R.E. Meyer, D.A. Palmer, W.D. Arnold, F.I. Case: " Adsorption of Nuclides on Hydrous Oxides: Sorption Isotherm on Natural Materials", in Geochemical behaviour of disposed radioactive waste (ACS Symp. Series No. 246), Washington DC., 79 (1984).
11. R.N.J. Comans, J.J. Middelburg, Geochim. Acta, 51, 2587 (1987).
12. J.A. Davis, C.C. Fuller, A.D. Cook, Geochim. Cosmochim. Acta, 51, 1447 (1987).

13. J.M. Zachara, J.A. Kittrick, L.S. Dake, J.B. Harsh, *Geochim, Cosmochim. Acta*, 53, 9 (1989).
14. R. Calas, P. Pascal: "Nouveuau traite de Chimie Mineral", Masion & Cie ed, Paris (1965).
15. J. Kragten : "Atlas of Metal-Ligand Equilibria in Aqueous Solution", Ellis Horwood Ltd., Chichester (1978).
16. NEA: "Thermodynamical Data Base", OECD Paris.
17. R.M. Smith, A.E. Martell: "Critical Stability Constant", In *Inorganic complexes*, Vol 4, Plenum Press-New York (1986).
18. V.B. Spivakovskii, L.P. Mosa, *Zh. Neorg Khim.*, 22, 1178 (1977).
19. Y. Suzuki, H. Saitoh, Y. Aihara, Y. Tateyama, *J. Less-Common Metal*, 149, 179 (1989).

DISKUSI

Gunandjar:

1. Mohon bisa dijelaskan mengapa kalsit mempunyai kapasitas lebih besar daripada ortoklas dan smektit paling besar (bila ditinjau dari struktur bahan-bahan tsb serta mekanisme penyerapannya?

Pratomo:

Interpretasi didasarkan hasil yang diperoleh. Mekanisme Freundlich pada kalsit dengan kapasitas sampai 38 $\mu\text{g/L}$, untuk cara perhitungan yang sama memberikan hasil jarak antar Nd^{3+} lebih pendek daripada ortoklas (Languir). Jarak tersebut untuk kalsit, 0,4 nm, lebih pendek dari parameter kristal kalsit 0,66 nm (rombohedral) dan untuk ortoklas, 1 nm, berorde sama dengan parameter kristalnya 0,8; 1,28 dan 0,71 nm (monoklin). Walaupun konstanta kesetimbangan K, lebih kecil untuk kalsit, harga Kd pada konsentrasi rendah jauh lebih besar, mengandung arti afinitas sampai yang lebih besar untuk kalsit. Karenanya kapasitas sampai pada kalsit lebih besar. Adanya penjelasan lain : menurut struktur permukaan jari padat, belum ditinjau. Namun hal tersebut merupakan ide baru bagi kami untuk dilakukan pada studi berikutnya terutama untuk studi fundamental.

H.I. Komala:

Dalam judul makalah yang menjadi obyek penelitian adalah kalsit, namun pada kesimpulan disebutkan pula mineral-mineral lain. Mengapa langsung diekspos 'kalsit' padahal kelihatannya masih ada keraguan dalam penelitiannya.

Pratomo:

Studi interaksi radioelemen dengan bahan-bahan alam (batuan atau mineral-mineral), yang salah satunya disajikan dalam makalah ini, belum selesai. Untuk maksud pengayaan "bank data", perlu dilakukan studi dengan sebanyak mungkin mineral-mineral lain. Dalam hal ini tidak dimaksudkan mencari kapasitas terbaik. Perbandingan hasil-hasil studi antara mineral-mineral individu sangat penting sebagai introduksi untuk studi-studi dengan campuran-campuran mineral/batuan (dalam hal mempelajari kompetisi antara mineral-mineral individu yang ditinjau).