



## STUDI KARAKTERISTIK FISIK BENTONIT UNTUK BAHAN PENYANGGA PADA SISTEM PENYIMPANAN LIMBAH RADIOAKTIF

Suryantoro, Arimuladi S.P., Pratomo Budiman-Sastrowardoyo<sup>1)</sup>

### ABSTRAK

**STUDI KARAKTERISTIK BENTONIT SEBAGAI CALON BAHAN PENYANGGA PADA SISTEM PENYIMPANAN LIMBAH RADIOAKTIF.** Penelusuran literatur tentang beberapa karakteristik bentonit, sebagai calon bahan penyangga dalam sistem penyimpanan limbah radioaktif, telah dilakukan. Beberapa informasi telah diperoleh dari berbagai pustaka, yang akan disumbangkan dalam pengkajian unjuk kerja penghalang rekayasa. Fungsi bentonit tersebut meliputi sifat penyanggaan secara fisika dan kimiawi, diantaranya sifat swelling, self sealing, konduktivitas hidraulik serta permeabilitas gas. Dalam makalah ini juga disajikan tentang kestabilan jangka panjang bentonit dalam kondisi alami berkaitan dengan illitisasi, yang dapat mengubah kapasitas penyanggaannya. Dari informasi-informasi tersebut ditunjukkan bahwa bentonit dapat digunakan sebagai calon bahan buffer dalam sistem penyimpanan limbah.

### ABSTRAK

**CHARACTERISTICS STUDY OF BENTONITE AS CANDIDATE OF BUFFER MATERIALS FOR RADIOACTIVE WASTE DISPOSAL SYSTEM.** Literature studies on bentonite characteristic of, as candidate for radioactive waste disposal system, have been conducted. Several informations have been obtained from references, which would be contributed on performance assessment of engineered barrier. The functions bentonite includes the buffering of chemical and physical behavior, i.e. swelling property, self sealing, hydraulic conductivities and gas permeability. This paper also presented long-term stability of bentonite in natural condition related to the illitization, which could change its buffering capacities. These information, showed that bentonite was satisfied to be used for candidate of buffer materials in radioactive waste disposal system.

### PENDAHULUAN

Penyimpanan limbah di dalam formasi geologi merupakan opsi yang telah banyak disepakati untuk limbah aktivitas tinggi dan umur panjang<sup>1,2)</sup>. Dalam kaitan ini limbah olahan ditempatkan pada kedalaman sekitar 500 - 1000 m dari permukaan tanah, dengan suatu sistem multi barrier. Sistem multi barrier penyimpanan limbah radioaktif meliputi penghalang rekayasa dan penghalang alami. Penghalang rekayasa meliputi limbah olahan hasil imobilisasi, wadah non-korosif, "overpack" serta bahan urug/bahan buffer. Sedangkan formasi geologi itu sendiri berfungsi sebagai barrier alami.

Telah dikenal pula bahwa bentonit merupakan calon utama penyusun bahan buffer dalam sistem penyimpanan limbah radioaktif tersebut. Dalam bentuk terkompaksi, bentonit dipertimbangkan sebagai calon bahan penyangga, yang terutama karena konduktivitas hidraulik yang rendah serta faktor retardasi yang tinggi terhadap pelepasan radionuklida dari suatu fasilitas penyimpanan limbah radioaktif<sup>3,4)</sup>. Kompaksi terhadap bentonit dimaksudkan untuk memperoleh unjuk kerja yang optimal untuk sebagai bahan penyangga, yang kadang-kadang perlu dicampur dengan pasir silika. Umumnya kompaksi bentonit dilakukan untuk mencapai densitas antara 1800 - 2200 kg/m<sup>3</sup>. Rendahnya konduktivitas hidraulik bentonit ialah untuk menghambat intrusi air tanah ke wadah limbah, yang karenanya akan menunda korosi wadah limbah tersebut, yang dengan sendirinya juga akan menunda pelarutan radionuklida dalam limbah. Sementara itu fungsi retardasi bentonit berperan setelah terjadi korosi wadah limbah, disusul pelarutan radionuklida ke badan air, dan radionuklida diangkutasi melalui bentonit sebagai barrier terakhir sebelum ke lingkungan fasilitas. Hal tersebut berlangsung setelah sekitar 1000 tahun. Berbagai penelitian tentang retardasi transport radionuklida dalam bentonit, di banyak negara, telah dilakukan. Oleh Budiman-S, dkk., sejumlah diantaranya telah dirangkum dalam laporannya<sup>5,6)</sup>.

Bentonit merupakan batuan clay yang mengandung group mineral smektit sebagai komponen utama. Adanya mineral tersebut memberikan sifat bentonit memiliki konduktivitas hidraulik yang rendah serta kapasitas serap yang tinggi, disamping sifat swelling serta konduksi thermal yang baik<sup>3,4)</sup>. Group mineral

<sup>1)</sup> Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif - BATAN

smektit berdasarkan strukturnya dibedakan sebagai smektit di-oktahedral (montmorilonit, beidellite dan nontronite) dan smektit tri-oktahedral (hectorite, saponite dan stevensite)<sup>[7]</sup>. Diantara smektit tersebut, montmorilonit merupakan mineral paling menonjol, sehingga seringkali menggantikan kata smektit itu sendiri. Tergantung penggunaannya terdapat 2 jenis bentonit alami, yaitu Na-bentonit dan Ca-bentonite. Untuk digunakan sebagai bahan penyangga dalam sistem penyimpanan limbah tanah dalam, jenis Na-bentonite merupakan type bentonit lebih baik<sup>[4]</sup>.

Dalam makalah ini disajikan tinjauan tentang beberapa karakteristik fisik dan kimiawi bentonit yang diperlukan bagi bahan buffer dalam sistem penyimpanan limbah radioaktif. Data dikumpulkan dari berbagai hasil penelitian di beberapa negara dunia, yang diharapkan dapat dijadikan acuan untuk penelitian dengan bentonit asal Indonesia dikemudian hari.

## BAHASAN

### Komposisi Bentonite

Bentonite; term geologis untuk clay, yang dihasilkan dari alterasi hidrotermal abu vulkanik. Clay ini kaya akan swelling mineral, terutama montmorilonite, yang mempunyai kegunaan sangat luas dan secara komersial ada dalam banyak bentuk. Untuk NAGRA bentonit Volclay MX-80, berasal dari Wyoming dan Dakota Selatan (USA), digunakan sebagai acuan karena telah banyak diteliti secara detail. Namun bentonite lain dapat memenuhi kebutuhan yang diperlukan untuk perencanaan repository. Ca-bentonite dalam bentuk highly-compacted (Montogel, Bavarian - FRG) juga layak digunakan ditinjau dari aspek difusi, sifat swelling, konduktivitas hidraulik maupun kapasitas penukaran ionnya. Namun kapasitas loading mekanik lebih banyak ada untuk MX-80. Pada Tabel 2 berikut disajikan komposisi mineral berbagai jenis bentonit.

Tabel 1. Komposisi bentonit (%).

Mineral	MX-800 (AS) <sup>[11]</sup>	Kunigel V1 (Jepang) <sup>[4]</sup>	Berapaw (Canada) <sup>[21]</sup>
Na-montmorilonit	75	46 - 49	80
Illite			10
Quartz	15,2	29 - 38	minor
Glimer	< 1		
Feldspar/plagioklas	5 - 8	2,7 - 5,5	minor
Kalsit/Carbonate	1,4	2,1 - 2,6	minor
Kaolinite	< 1	-	
Zeolit		3,0 - 3,5	
Dolomit		2,0 - 3,8	
Pirit	0,3	0,3 - 0,7	
Organic Carbon	0,4		minor
Lain-Lain	2		

### Sifat "Buffering" dan "Self Sealing Bentonite"

Sebagai buffer material, bentonite harus dapat menyusun suatu zone proteksi mekanik dan hidraulik disekitar kanister limbah penyimpanan limbah. Sifat ini akan membatasi transport groundwater bentuk bahan-bahan korosif menuju permukaan kanister, dan pada tingkat selanjutnya akan membatasi migrasi radionuklida ter-"released" dari embedded waste. Selain itu stress batuan ditransfer ke kanister melalui sifat plastik bentonite dan panas radiogenic dikonduksi menuju host rock. Kegunaan bentonite sebagai pengisi ruang-ruang kosong dalam repository terutama peran rock-supporting, disamping permeabilitas yang rendah.

### Density dan Pengerutan karena Pengeringan

Sifat-sifat mekanik highly-compacted bentonite tergantung pada densitasnya. Pada pemasangan dalam bentuk blok, dengan sifat swelling dan sifat plastiknya, bentonite akan mengisi ruang kosong disekitarnya dan massa homogen dari swollen bentonite terbentuk. Dry density (ratio massa dan volume total  $m^3/V$ ) dipilih sebagai parameter kunci untuk sifat-sifat tersebut. Akibat kenaikan volume yang ringan saat swelling, dry density bentonite akan turun menjadi dry density tereduksi ( $f_{red}$ ). Spesifik bentonite. Density spesifik bentonite MX-80,  $f = 2760 \text{ kg.m}^3$  dengan porositas

$$E = 1 - \frac{V_s}{V}$$

$V_s$  ialah volume padatan bentonite.

Uptake air oleh bentonite akan mengisi pori-pori. Suatu sample dengan kandungan air  $w$  (ratio massa air dan massa padatan,  $m_s/m_n$ ) akan mempunyai bulk density  $f_{eu}$ . Saat keadaan saturasi, dimana semua pori-pori bentonite terisi air, kandungan air menjadi  $w_{sat}$  dengan bulk density  $f_{sat}$ . Hubungan antar parameter-parameter tersebut dirangkum dalam Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Parameter untuk penguraian uptake air oleh bentonite.

Kondisi Bentonite	Kandungan Air	Density
Dry	0	$f_{eu} = f \cdot (1 - e)$
Damp	$w$	$f_{eu} = f_{red}(1 - w)$
Saturated	$w_{sat} = \frac{e_{fair}}{(1 - e) \cdot f}$	$f_{eu} = f_{red}(1 - w_{sat})$

Sebagai ilustrasi, untuk MX-80, pada  $f_{red} = 1700 \text{ kg.m}^{-3}$ , dengan asumsi  $f_{air} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ , diperoleh  $E = 0.38$ ,  $w_{sat} = 0.22$  dan  $f_{sat} = 2070 \text{ kg.m}^{-3}$ . Perubahan volume akibat uptake air tidak sepenuhnya reversibel. Saat pemanasan dilakukan pada bentonite, terjadi pengerutan dimana volumenya turun dengan turunnya kandungan air. Hasil experiment menunjukkan bahwa penurunan volume tersebut proporsional terhadap dry density maupun kandungan air mula-mula. Dalam keadaan ini keretakanpun timbul. Sebagai contoh untuk MX-80, pada  $f_{red} = 1700 \text{ kg.m}^{-3}$  dan water content  $w = 8\%$ , perubahan volume akibat pengeringan ialah sekitar 5%. Kemungkinan terjadinya keretakan akibat pengeringan tersebut perlu diperhitungkan dalam kalkulasi temperatur repository. Saat uptake air terjadi lagi ke dalam pori-pori bentonite, retakan pada bentonite akan hilang dan massa bentonite kembali homogen.

#### Swelling Highly-Compacted Bentonite

Swelling bentonite terjadi saat uptake air. Untuk kasus repository, kenaikan volume yang significant dari bentonite harus dicegah karena dapat terjadinya tekanan swelling isostatik. Tekanan swelling yang terjadi bergantung pada density swollen-bentonite, seperti ditunjukkan untuk MX-80. Dengan sifat swellingnya tersebut, bentonite cenderung mengisi fissure dan crack dalam batuan sekitar repository. Karena volume fissure dan crack tersebut sangat kecil dibandingkan total massa bentonite, maka penurunan volumenya tidak significant dan karenanya perubahan sifat-sifat bentonite tidak terjadi. Suatu gel terbentuk disekitar fissure batuan yang cukup viscous sehingga tidak terdapat kehilangan massa oleh adanya erosi. Tekanan swelling bekerja pada baik terhadap kanister maupun batuan, hal ini tidak boleh terlalu tinggi karena bersama dengan adanya tekanan hidrostatik dapat menimbulkan tekanan lithostatik pada sekitar 30 MPa. Karenanya terdapat suatu batas density yang diperbolehkan, sementara kenaikan density memberikan sifat favourable sebagai fungsi bahan buffer. Hasil experiment memperlihatkan untuk dry density 1650 - 1750  $\text{kg/m}^3$  pada temperatur 25°C memberikan tekanan swelling 4 - 18 MPa, yang merupakan nilai paling cocok bagi suatu repository. Untuk density tersebut penurunan kecil tekanan swelling terjadi dengan kenaikan temperatur, karena itu tekanan pada kanister maupun batuan tidak akan melampaui 30 MPa sekalipun selama awal pemancaran panas radiogenik.

#### Konduktivitas Hidraulik dan Permeabilitas Gas pada Bentonite

Konduktivitas hidraulik bentonite sebagai fungsi density telah banyak dipelajari. Besaran tersebut bergantung pada temperatur dan salinitas pore-water. Pada density  $f_{red} = 1650 - 1750 \text{ kg/m}^3$  pengukuran dengan oedometer memberikan konduktivitas hidraulik  $10^{-13} - 10^{-14} \text{ m/s}$  bagi bentonite murni. Hal ini berarti bahwa demikian saturasi dicapai, bahan buffer akan bersifat impermeabel bagi air dan transport zat terlarut hanya terjadi melalui proses difusi. Permeabilitas gas pada bentonite merupakan parameter penting karena adanya hidrogen hasil korosi kanister. Gas tersebut dikeluarkan dengan cepat untuk menghindari timbulnya tekanan lokal tinggi. Pada tekanan rendah permeabilitas bentonite juga rendah, namun pada tekanan 30 - 70 % tekanan swelling nonlinieritas terjadi dengan kenaikan permeabilitas sekitar 100x. Hal ini dapat dijelaskan

oleh kemungkinan adanya channeling atau efek penapisan, dimana gas keluar melalui suatu sistem pori penghubung yang ukuran rata-ratanya lebih besar. Sesuai hasil yang ada efek bersifat reversibel, yaitu turunnya tekanan juga disertai penurunan permeabilitas, walaupun terdapat beberapa histeresis. Aliran gas diatas nilai ambangnya cukup melepas hidrogen hasil korosi, sehingga tekanan tinggi yang diperkirakan menimbulkan visinuity kanister tidak terjadi.

#### "Longterm Stability" Bentonite

Telah dikenal bahwa smectite dalam clay kurang stabil dan berangsur-angsur berubah menjadi illite. Hal ini terjadi pada suhu tinggi dan adanya supply pottasium yang cukup. Perubahan ini terjadi melalui tahapan berikut:

- ▶ Suatu kisi muatan terjadi karena pergantian isomorfis dari silikon oleh aluminium dalam kisi kristal. SiO<sub>2</sub> terluat dan mengendap pada permukaan clay atau dalam pori-pori.
- ▶ Jika cukup adanya potasium yang berasal dari groundwater atau dari mineral-potasium, seperti feldspar, mica, dll., dapat terjadi pertukaran ion dalam bentonite.
- ▶ Dalam daerah naiknya kisi muatan, potassium dapat bergabung ke dalam struktur mineral. Dengan demikian illite terjadi dari montmorillonite disertai perubahan sifat swelling.

Dibandingkan bentonite, konduktivitas hidraulik illite dapat berkisar 2 orde magnitudo lebih besar untuk density yang setara. Namun, dari investigasi pada deposit alami diperlihatkan bahwa laju alterasi smektite kurang dari 0.3% per juta tahun. Dari studi analog maupun eksperimen langsung, bentonite dalam repository akan berada pada temperatur dibawah 100°C sampai lebih dari 1 juta tahun. Sehingga pemaparan panas radiogenic tidak berpengaruh pada long-term stability buffer material.

- ▶ Pulsa panas menurun cepat hingga beberapa dekade.
- ▶ Pada saat yang sama bentonite masih dalam keadaan relatif kering, yang dapat diartikan bahwa syarat yang perlu untuk terjadinya alterasi tidak dipenuhi.
- ▶ Walaupun tak mungkin, terjadinya alterasi sempurna atau sebageian pada zone kecil diatas 100 °C, dalam zone lebih dingin kemampuan swelling bentonite sebagai fungsi barrier masih cukup ada.
- ▶ Proses alterasi bagaimanapun dibatasi oleh cukup adanya potassium.

#### SIMPULAN

Dari studi pustaka ini telah diperoleh sejumlah informasi tentang beberapa karakteristik bentonit, yang mendukung bagi penggunaan bentonit sebagai bahan buffer dalam sistem penyimpanan limbah radioaktif. Sementara itu, data yang ada ialah untuk beberapa bentonit yang sudah banyak dikenal di dunia. Namun dalam perencanaan untuk diaplikasikan di Indonesia, belum cukup data tentang karakteristik bentonit asal Indonesia. Sehingga pada masa yang akan datang perlu dilakukan percobaan-percobaan lebih menggunakan bentonit Indonesia.

#### DAFTAR ACUAN

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: An overview of the current status of understanding and development*". OECD, Paris (1984).
3. PUSCH, R., *Use of Clays as Buffers in Radioactive Repository*, Univ. Lulea (1983).
4. PNC, *Research and Development on Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste*, PNC-TN1410 93-012, PNC Technical Report, Tokyo (1993).
5. BUDIMAN-SASTROWARDOYO., P., D. SUSILWATI, SUGANDA, D., "Studi migrasi aktinida dan lantanida dalam bentonit terkompaksi", *J. Teknologi Pengolahan Limbah* 5, hal (1998)
6. BUDIMAN-SASTROWARDOYO., P., et. al., "Studi migrasi hasil fisi dalam bentonit terkompaksi", in press.
7. CALAS, R., PASCAL, P., "*Nouveau traite de Chimie Mineral*", Vol. IV, Masson & Cie. Ed., Paris (1965), 182.