

**INTERAKSI PENYERAPAN Cs-137 OLEH BAHAN ALAM LOKAL
(BENTONIT DAN KAOLIN) SEBAGAI BAHAN PENYANGGA
PADA SISTEM PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF**

TESIS

Oleh :

ELFIRA MAYA SARI

1121207001



**JURUSAN KIMIA
PROGRAM PASCASARJANA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS ANDALAS
PADANG**

2013

**INTERAKSI PENYERAPAN Cs-137 OLEH BAHAN ALAM LOKAL
(BENTONIT DAN KAOLIN) SEBAGAI BAHAN PENYANGGA
PADA SISTEM PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF**

Oleh :

Elfira Maya Sari (1121207001)

(Di bawah bimbingan Prof. Dr. Safni dan Dr. Budi Setiawan)

RINGKASAN

Adanya rencana introduksi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Kepulauan Bangka-Belitung diperkirakan akan menimbulkan limbah radioaktif dalam kuantitas yang cukup besar. Untuk mengantisipasi masalah keselamatan terhadap lingkungan masyarakat perlu diadakannya suatu pengkajian tentang keselamatan fasilitas pembuangan limbah radioaktif (PLRA) yang diharapkan memberikan rasa aman pada masyarakat. Salah satunya dapat diperoleh dari sifat bahan penyangga yang cocok untuk menghambat kemungkinan adanya migrasi kontaminan radioaktif dari fasilitas pembuangan ke lingkungan. Bahan penyangga berupa mineral alam lokal seperti bentonit dan kaolin. Kaolin termasuk mineral dengan struktur kristal yang berbentuk di-oktahedral mineral clay (1:1) dengan dua lapisan yaitu silika $[\text{SiO}_4]$ lapisan tetrahedral dan aluminium $[\text{Al}_2(\text{OH})_4]$ lapisan oktahedral yang terbentuk melalui proses pelapukan atau alterasi hidrotermal mineral aluminosilikat sedangkan bentonit merupakan mineral *clay*

yang dihasilkan dari hasil pelapukan dan reaksi hidrotermal batuan lava (vulkanik).

Parameter yang dilakukan pada penelitian ini adalah kinetika sorpsi, kinetika desorpsi, pengaruh konsentrasi NaCl dalam larutan, pengaruh konsentrasi CsCl dan pengaruh karbonat dalam larutan. Hasil yang diperoleh dari radiocesium sorpsi dan desorpsi oleh kaolin dan bentonit telah dicapai kondisi setimbang setelah waktu kontak hari ke – 5 dan ke – 8, berturut - turut. Dalam kinetika sorpsi nilai Kd semakin meningkat sedangkan nilai Kd desorpsi semakin menurun dan terus konstan pada hari berikutnya. Nilai Kd yang diperoleh berkisar 1000 – 3700 ml/g dan 300 – 1500 ml/g untuk sorpsi dan desorpsi secara berurutan masing – masing pada konsentrasi CsCl 10^{-8} M. Meningkatnya pengaruh konsentrasi NaCl sebagai pengaruh kekuatan ion (*ionic strength*) larutan terhadap sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit terlihat telah menurunkan nilai Kd yang diperoleh. Hal ini diakibatkan telah terjadinya kompetisi antara ion radiocesium dan Na di sekitar sampel. Pengaruh konsentrasi CsCl dengan konsentrasi yang diberikan 10^{-8} sampai 10^{-4} M dapat menyebabkan nilai Kd menurun secara nyata. Hal ini disebabkan karena keterbatasan kapasitas serap ion Cs oleh sampel. Adanya peningkatan konsentrasi Cs di larutan akan menaikkan jumlah Cs yang tersisa di larutan yang pada akhirnya akan menurunkan koefisien distribusi dari Cs pada sampel. Pengaruh konsentrasi karbonat terhadap sorpsi radiocesium dalam larutan pada kaolin dan bentonit dapat ditunjukkan dengan nilai Kd yang semakin menurun dengan semakin meningkatnya konsentrasi karbonat. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh ion Na yang digunakan dalam karbonat sehingga dapat menurunkan nilai Kd.

**INTERAKSI PENYERAPAN Cs-137 OLEH BAHAN ALAM LOKAL
(BENTONIT DAN KAOLIN) SEBAGAI BAHAN PENYANGGA
PADA SISTEM PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF**

Oleh :

ELFIRA MAYA SARI

1121207001

TESIS

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains
pada Jurusan Kimia Program Pascasarjana Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam Universitas Andalas**

JURUSAN KIMIA

PROGRAM PASCASARJANA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS ANDALAS

PADANG

2013

Judul Penelitian : INTERAKSI PENYERAPAN Cs-137 OLEH BAHAN ALAM LOKAL (BENTONIT DAN KAOLIN) SEBAGAI BAHAN PENYANGGA PADA SISTEM PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF

Nama Mahasiswa : ELFIRA MAYA SARI

Nomor pokok : 1121207001

Program Studi : Kimia

Tesis ini telah diuji dan dipertahankan di depan sidang panitia ujian akhir Magister Sains pada Program Pascasarjana Universitas Andalas dan dinyatakan lulus pada tanggal 17 Juli 2013.

Menyetujui

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Prof. Dr. Safni, M.Eng
NIP. 19670512 199003 2 001

Pembimbing II

Dr. Budi setiawan
NIP. 19610723 198603 1 006

2. Koordinator Pascasarjana FMIPA
Universitas Andalas

Prof. Dr. Sumaryati Syukur
NIP. 195501041980102001

3. Dekan FMIPA Universitas Andalas

Prof. Dr. Edison Munaf, M.Eng
NIP. 195807221983031002

PERSEMBAHAN

"Pengetahuan adalah Kekuatan"

"Hanya Kebodohan meremehkan pendidikan (P.Syrus)"

"Pendidikan merupakan perlengkapan paling baik untuk hari tua (Aristoteles)"

Dengan segenap rasa syukur dan karunia Allah SWT kupersembahkan Tesis ini untuk :

- ☞ Ayahanda dan Ibunda (Maspul dan Yati Sumarni), Abang Andi, Adik Refika tercinta yang telah memberikan dukungan, doa dan kasih sayang serta Cinta kalian membuat diriku Tegar selama ini...Harapan kalian yang membuat semangat ku membara, kemudian Abang tercinta (Riki) yang telah memberikan cinta dan kasih sayang dalam hidupku.....hahaa
- ☞ Kepada ke 2 dosen pembimbing (Bu Safni dan Pak Budi) yang telah membimbing selama penulisan Tesis Ini...tentunya.....!!!! terima kasih tuk ibu dan bapak....
- ☞ Buat Teman - teman seperjuangan di BATAN (Gist Shely, Eka dan Arif), LIPI (Dini, iwit dan iie) yang sama berjuang u/ penelitian keluar., hehe...dan rekan kimia S2`2011 serta sahabat yang telah membantu dan berjuang bersama untuk mendapatkan gelar Magister Sains....

"Semoga ilmu yang didapat dipergunakan dengan sebaiknya dan dibutuhkan di lingkungan Masyarakat"

(Aamiin ya ALLAH)

Sesungguhnya setiap kesulitan tersimpan hikmah,

dan sesudahnya pasti ada kemudahan, karenanya bersabarlah karena sabar itu indah. "Allah SWT tidak membebani seseorang,

melainkan sesuai dengan kesanggupannya"

(QS. Al-Baqarah : 286)

Lovingly

^fhira^

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini menyatakan bahwa tesis yang Saya tulis dengan judul “Interaksi Penyerapan Cs-137 oleh Bahan Alam Lokal (Bentonit dan Kaolin) Sebagai Bahan Penyangga Pada Sistem Pembuangan Limbah Radioaktif” adalah hasil karya Saya sendiri dan bukan merupakan jiplakan karya orang lain, kecuali kutipan yang sumbernya dicantumkan. Jika dikemudian hari pernyataan yang Saya buat ini ternyata tidak benar, maka status kelulusan dan gelar yang Saya peroleh menjadi batal dengan sendirinya.

Padang, Juli 2013

Yang membuat pernyataan,



Elfira Maya Sari

No.BP. 1121207001

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan pada tanggal 8 Agustus 1988 di Arga Makmur, Bengkulu Utara. Anak kedua dari tiga bersaudara, pasangan Maspul dan Yati Sumarni. Penulis menjalani pendidikan sekolah dasar di SDN 23 Kota Arga Makmur dan tamat pada tahun 1999, kemudian mengikuti pendidikan lanjutan di SLTP N 1 Kota Arga Makmur dan selesai pada tahun 2002. Setelah tamat dari SLTP N 1 Kota Arga Makmur melanjutkan ke Sekolah Menengah Atas (SMA) Negeri 2 Kota Arga Makmur dan selesai tahun 2005. Penulis menempuh pendidikan ditingkat Universitas tahun 2006 pada program studi kimia Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Universitas Andalas, pada tanggal 17 Januari 2011 memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si). September 2011 Penulis mendapatkan kesempatan melanjutkan pendidikan pada Program Studi kimia Pascasarjana Universitas Andalas Padang dan memperoleh gelar Magister Sains (M.Si) pada tanggal 17 Juli 2013.

KATA PENGANTAR



Alhamdulillahirabbil'alamin, puji syukur kehadirat Allah SWT dan shalawat beriring salam untuk Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul **Interaksi Penyerapan Cs-137 Oleh Bahan Alam Lokal (Bentonit dan Kaolin) Sebagai Bahan Penyangga Pada Sistem Pembuangan Limbah Radioaktif.** Tesis ini ditulis sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Magister Sains di Jurusan Kimia, Program Pascasarjana, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas, Padang.

Dalam penulisan tesis ini, penulis banyak mendapat bantuan, dorongan, dan saran dari berbagai pihak. Dengan ketabahan dan penuh keyakinan, akhirnya penulis dapat menyelesaikan tesis ini, sehingga penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Ibu Prof. Dr. Safni, M.Eng sebagai dosen pembimbing I dan Bapak Dr. Budi Setiawan sebagai dosen pembimbing II yang telah memberikan ilmu serta saran yang tidak ternilai harganya, sehingga penelitian ini berjalan lancar dan sesuai dengan yang diharapkan.
2. Bapak Prof. Dr. Hamzar Suyani, Bapak Prof. Dr. Admin Alif dan Dr. Zilfa sebagai dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran terhadap penulisan tesis ini.
3. Kepala Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – Badan Tenaga Nuklir Nasional, Bapak Drs. Heru Umbara atas izin yang diberikan untuk melakukan penelitian.
4. Kepala Bidang Teknologi Penyimpanan Lestari – Pusat Teknologi Penyimpanan Lestari, Bapak Ir. Sucipta, M.Si atas fasilitas yang diberikan untuk melaksanakan kegiatan penelitian.
5. Bapak Teddy Sumantry, B.Sc dan Ibu Nurul Efri Ekaningrum atas bantuannya selama preparasi bahan kimia dan radioaktif.

6. Rekan – rekan Angkatan 2011 jurusan kimia program pascasarjana yang telah memberikan dukungan selama penulisan tesis ini
7. Orang tua, kakak, abang dan adik atas dukungan dan doanya sehingga kegiatan ini dapat berlangsung dengan baik.

Kami yakin bahwa penulisan ini masih jauh dari sempurna sehingga koreksi dan saran perlu diberikan kepada penulis. Akhirnya penulis berharap semoga tesis ini dapat bermanfaat untuk kemajuan ilmu pengetahuan di Indonesia, *aamiin*.

Padang, Juli 2013

Penulis

DAFTAR ISI

RINGKASAN	
HALAMAN PENGESAHAN	
HALAMAN PERSEMBAHAN	
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	
RIWAYAT HIDUP	
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR LAMPIRAN	vi
BAB I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Clay</i>	5
2.2 Cesium	10
2.3 <i>Multi Channel Analyzer (MCA)</i>	11
2.4 Sistem Pembuangan Limbah Radioaktif.....	13
2.5 Fenomena Penyerapan (Sorpsi)	18
2.6 Pengaruh Konsentrasi NaCl dalam larutan.....	20
2.7 Pengaruh Konsentrasi CsCl	20
2.8 Pengaruh Penambahan Karbonat	21
BAB III. METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Penelitian	22
3.2 Prosedur Kerja	22
3.2.1 Alat.....	22
3.2.2 Bahan	22
3.2.3 Preparasi Sampel	23
3.2.4 Tempat pengambilan Sampel dan Labeling.....	23
3.2.5 Penentuan Kinetika Sorpsi	24
3.2.6 Penentuan Kinetika Desorpsi.....	24
3.2.7 Penentuan Pengaruh Konsentrasi NaCl.....	25
3.2.8 Penentuan Pengaruh Konsentrasi CsCl.....	26
3.2.9 Penentuan Pengaruh Karbonat dalam Larutan.....	26
BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Kinetika Sorpsi dan Desorpsi.....	27
4.2 Pengaruh Konsentrasi NaCl dalam Larutan.....	31
4.3 Pengaruh Konsentrasi CsCl.....	33

4.4 Pengaruh Karbonat dalam Larutan.....	34
BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan.....	36
5.2 Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA	38
LAMPIRAN	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Struktur Kaolin.....	6
Gambar 2. Kaolin di alam.....	7
Gambar 3. <i>Montmorillonite</i> (Bentonit).....	8
Gambar 4. Struktur dari Bentonit.....	9
Gambar 5. Alat <i>Multi Channel Analyzer</i> (MCA) Spektrometer Gamma.....	12
Gambar 6. Pengelolaan limbah radioaktif di PTLR	14
Gambar 7. Paket Limbah Drum dan <i>Shell</i>	15
Gambar 8. Sistem penghalang berlapis pada salah satu fasilitas PLRA jenis dekat permukaan.....	17
Gambar 9. Distribusi Radiocesium Kinetika Sorpsi pada (a) kaolin, (b) bentonit terhadap fungsi waktu kontak.....	28
Gambar 10. Distribusi Radiocesium pada Kinetika Desorpsi untuk setiap kaolin dan bentonit terhadap fungsi waktu kontak.....	30
Gambar 11. Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel	32
Gambar 12. Pengaruh konsentrasi CsCl terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel.....	33
Gambar 13. Pengaruh konsentrasi karbonat terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel.....	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Penentuan Koefisien Distribusi (Kd) pada Kinetika Sorpsi.....	40
Lampiran 2. Penentuan Koefisien Distribusi (Kd) pada Kinetika Desorpsi.....	42
Lampiran 3. Penentuan Pengaruh Konsentrasi NaCl.....	44
Lampiran 4. Penentuan Pengaruh Konsentrasi CsCl.....	45
Lampiran 5. Penentuan Pengaruh Karbonat dalam Larutan.....	46
Lampiran 6. Gambar Sampel (Bentonit dan Kaolin) dalam 100 mesh.....	47
Lampiran 7. Gambar Alat.....	48

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Adanya rencana introduksi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) di Kepulauan Bangka-Belitung diperkirakan akan menimbulkan limbah radioaktif dalam kuantitas yang cukup besar. Untuk mengantisipasi masalah keselamatan terhadap lingkungan dan masyarakat perlu diadakannya suatu pengkajian tentang keselamatan fasilitas pembuangan limbah radioaktif (PLRA) yang diharapkan memberikan rasa aman pada masyarakat terhadap aspek keselamatan pengelolaan limbah radioaktif (LRA). Salah satunya dapat diperoleh dari sifat bahan penyangga yang cocok untuk menghambat kemungkinan adanya migrasi kontaminan radioaktif dari fasilitas pembuangan ke lingkungan (Chapman dan Kinley, 1985). Berdasarkan hal tersebut perlu dilakukan kegiatan inventarisasi dan studi potensi calon bahan penyangga yang ada di sekitar kepulauan Bangka – Belitung dan Sumatera Barat. Inventarisasi potensi dilakukan dengan mempelajari sorpsi radionuklida oleh bahan penyangga.

Bahan penyangga berupa mineral alam lokal seperti bentonit dan kaolin yang berasal dari Pulau Bangka-Belitung dan Sumatera Barat merupakan salah satu bagian penting dalam sistem PLRA yang berperan sebagai penghambat kemungkinan penyebaran kontaminan radioaktif ke lingkungan. Kaolin dan bentonit sebagai bahan penyangga dengan sifatnya yang dapat kedap air/*impermeabel* akan berperan penting sebagai pengontrol laju air tanah, ditambah dengan kemampuannya yang baik untuk menyerap radionuklida (RN) di

air tanah diharapkan akan memberikan keuntungan sebagai bahan penghambat migrasi radionuklida dari fasilitas PLRA ke lingkungan (Brookins, 1986). Bahan-bahan ini digunakan karena murah, mudah diperoleh dan secara kuantitas cukup berlimpah tersedia di sekitar Kepulauan Bangka-Belitung dan Sumatera Barat (Anonim, 2012). Radiocesium digunakan karena sebagai representasi radionuklida yang dominan pada paket limbah radioaktif aktivitas rendah-sedang (Suryanto, 1997). Disamping itu data potensi sorpsi radionuklida pada mineral lokal asli Indonesia sampai saat ini masih sangat minim. Untuk alasan itulah maka interaksi mineral alam lokal bentonit dan kaolin dari Pulau Bangka-Belitung dan Sumatera Barat perlu untuk dilakukan.

Sampel kaolin dan bentonit diambil dari lokasi pertambangan di Pulau Bangka-Belitung dan di Sumatera Barat. Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan data keandalan mineral alam Indonesia (Kepulauan Bangka – Belitung dan Sumatera Barat) sebagai bahan penyangga pada sistem PLRA melalui pengambilan data spesifik interaksi sorpsi radionuklida oleh bentonit dan kaolin dari Pulau Bangka-Belitung serta dari Sumatera Barat. Interaksi sorpsi radiocesium akan dilakukan secara *batch*/catu di laboratorium. Data yang akan diambil adalah karakter sorpsi radiocesium oleh kaolin dan bentonit sebagai fungsi waktu, konsentrasi CsCl, konsentrasi NaCl dalam larutan dan pengaruh karbonat dalam larutan (Ding *et al.*, 2006 ; Mironenko, 2004). Tahap penelitian meliputi pengambilan sampel, preparasi sampel, percobaan pendahuluan, penentuan sorpsi, analisis data dan penulisan laporan. Hasil penelitian ini merupakan data penting yang akan dipakai sebagai masukan pada desain pembuangan limbah radioaktif di kemudian hari. Dapat dimanfaatkannya mineral

alam lokal yang ada disekitar pulau Bangka-Belitung dalam introduksi PLTN pertama diharapkan dapat memberikan dampak positif dalam meningkatkan ekonomi daerah dan masyarakat di pulau Bangka-Belitung dan sekitarnya. Selain itu, diperolehnya informasi teknis terhadap kemampuan sorpsi radiocesium oleh kaolin dan bentonit untuk menghambat radionuklida yang ada dalam larutan/air tanah.

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas maka dapat dirumuskan beberapa hal yaitu :

1. Bagaimanakah waktu kontak dari fenomena sorpsi dan desorpsi radionuklida Cs-137 oleh kaolin dan bentonit yang akan berperan sebagai bahan penyangga?
2. Bagaimana pengaruh konsentrasi NaCl terhadap sorpsi radionuklida Cs-137 oleh kaolin dan bentonit yang akan berperan sebagai bahan penyangga?
3. Bagaimana pengaruh konsentrasi CsCl di dalam larutan terhadap kemampuan sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit yang akan berperan sebagai bahan penyangga?
4. Bagaimanakah pengaruh karbonat dari Na_2CO_3 terhadap kemampuan sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit yang akan berperan sebagai bahan penyangga?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan data spesifik interaksi sorpsi radiocesium oleh kaolin dan bentonit dari Pulau Bangka-Belitung serta Sumatera

Barat, dimana data ini sangat diperlukan untuk disain dan pengkajian keselamatan PLRA saat perancangan fasilitas PLRA.

1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan untuk pengkajian keselamatan dan rancang-bangun fasilitas pembuangan limbah radioaktif (PLRA) di Pulau Bangka-Belitung pada masa yang akan datang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Clay

Menurut ahli mineralogi, mineral *clay* adalah mineral silikat berlapis (filosilikat) atau mineral lain yang bersifat liat (*plasticity*) dan mengalami pengerasan saat dipanaskan atau dalam keadaan kering. Mineral *clay* merupakan kelompok mineral penting karena kebanyakan mineral *clay* merupakan hasil pelapukan kimiawi. Mineral *clay* juga merupakan unsur utama tanah (*soil*) dan penyusun batuan sedimen. Mineral *clay* menyusun hampir 40 % pada batuan sedimen.

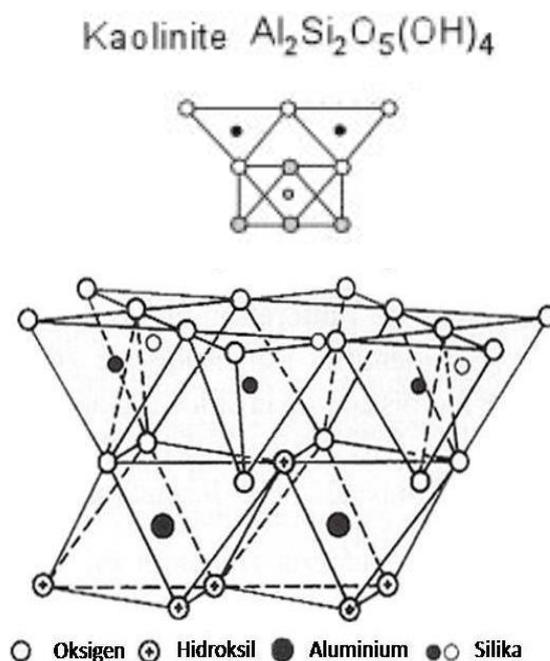
Istilah *clay* digunakan di Amerika Serikat dan *International Society of Soil Science* untuk menyatakan suatu batuan atau partikel mineral yang terdapat pada tanah (*soil*) dengan diameter kurang dari 0,002 mm sedangkan menurut sedimentologis, partikel *clay* berukuran kurang dari 0,004 mm.

Struktur dasar kristal pada mineral *clay* terdiri atas satu atau dua lapisan silikon dioksida dengan satu lembaran aluminium oksida atau magnesium oksida. Di dalam lapisan silika, unit dasarnya adalah silika tetrahedron. Pada struktur silika tetrahedron, atom silikon terikat pada 4 atom oksigen. Jika tiap tetrahedron membagi 3 dari 4 oksigen lain maka akan terbentuk struktur heksagonal yang disebut lapisan tetrahedral (Klein dan Hurlbut, 1993).

2.1.1 Kaolin

Kaolin merupakan bahan baku plastik, terutama terdiri dari kaolin mineral lempung. Menurut cara terjadinya, kaolin dapat dikelompokkan dalam tiga jenis,

yaitu kaolin residu, kaolin hidrotermal, dan kaolin sekunder atau sedimenter. Rumus kimia kaolin adalah $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (39,5% Al_2O_3 , 46,5% SiO_2 , 14,0% H_2O). Dalam mineralogi sistemik, kaolin memiliki peringkat di antara *phyllosilicates*, yang bertingkat dengan mineral lempung dibentuk oleh lapisan tetrahedral dan oktahedral. *Phyllosilicates* diklasifikasikan menjadi kelompok utama sesuai dengan jenis lapisan, *interlayer* konten, bertanggung jawab atas lapisan dan rumus kimia. Selain kelompok kaolin, serpentin, haloisit, pyrophyllit, mika, dan kelompok *montmorillonite* juga peringkat di antara *phyllosilicate*. Kelompok kaolin termasuk di-oktahedral mineral clay (1:1) dengan dua lapisan, silika [SiO_4] lapisan tetrahedral dan aluminium [$\text{Al}_2(\text{OH})_4$] lapisan oktahedral, seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Lapisan terikat bersama-sama dengan anion oksigen terbagi antara Al dan Si. Kedua lapisan ini disebut platelet.



Gambar 1. Struktur Kaolin

Kaolin terbentuk melalui proses pelapukan atau alterasi hidrotermal mineral aluminosilikat. Oleh karena itu, batuan yang kaya akan feldspar biasanya akan mengalami pelapukan menjadi kaolin, bentuk kaolin di alam ditunjukkan pada Gambar 2. Untuk pembentukan kaolin, maka pada proses pelapukan atau alterasinya harus bersih dari ion – ion seperti ion Na, K, Ca, Mg dan Fe. Proses pelepasan ion – ion tersebut dilakukan pada kondisi asam (pH rendah). Sumber pembentuk kaolin yang paling umum adalah batuan *granitic*, karena batuan *granitic* kaya akan feldspar.



Gambar 2. Kaolin di alam

Kaolin tidak dapat menyerap air, maka kaolin tidak dapat mengembang ketika kontak dengan air. Karena alasan inilah, maka kaolin merupakan tipe *clay* yang biasa digunakan dalam industri keramik. Selain itu, kaolin juga dapat digunakan dalam industri kertas sebagai pengisi (*filler*) dan pelapis (*coating*), industri cat, kosmetik, farmasi dan lain – lain. Mutu kaolin ditentukan oleh komposisi kimia, kecerahan (*brightness*) serta bentuk dan ukuran kristal (butiran).

2.1.2 Bentonit

Lempung bentonit pertama kali ditemukan secara tidak sengaja oleh Emile Pascal pada tahun 1830 di Big Horn, Wyoming, Amerika Serikat. Penemuan lain yang

menyebutkan *montmorilonite* pertama kali ditemukan sekitar tahun 1847 di Montmorillon di Poitou – Charentes, daerah selatan Loire Valley. Nama bentonit pertama kali digunakan oleh seorang geolog Amerika setelah penemuannya sekitar tahun 1890 di daerah anak sungai Montana's Rock. Rumus kimia dari bentonit $(1/2Ca,Na)(Al,Mg,Fe)_4(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4.nH_2O$.

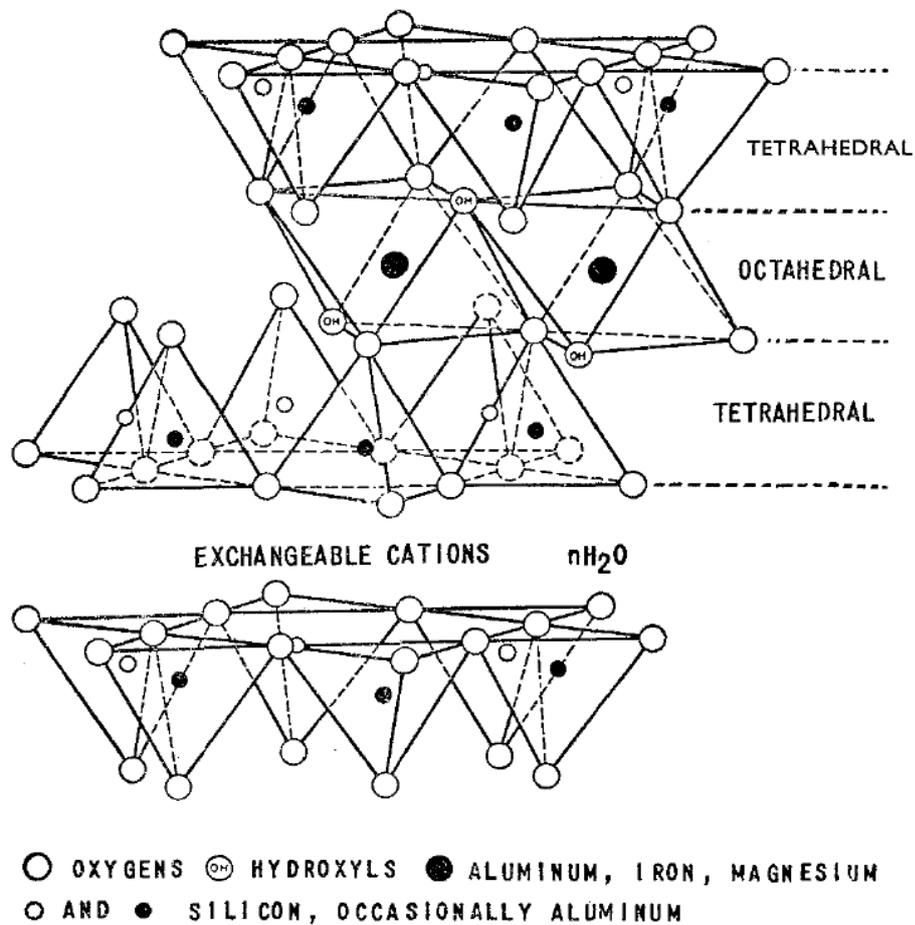
Bentonit merupakan mineral *clay* yang dihasilkan dari hasil pelapukan dan reaksi hidrotermal batuan lava (vulkanik), ditunjukkan pada Gambar 3. Sebagian besar bentonit merupakan mineral smektit, biasanya *montmorilonite*. Selain *montmorilonite*, bentonit juga mengandung mineral pengotor lain, seperti kuarsa, *illite*, kristobalit, feldspar, kalsit, gypsum, kaolin dan plagioklas.



Gambar 3. *Montmorilonite* (Bentonit)

Tipe bentonit juga memiliki nama berdasarkan pada unsur-unsur dominan penyusunnya, seperti K, Na, Ca dan Al. Pertama adalah tipe *swelling* atau *sodium bentonite* (Na-bentonit) yang lebih banyak kandungan Na^+ pada interlayernya. Na-bentonit disebut *swelling bentonite* karena jika didispersikan ke dalam air, maka bentonit akan mengembang hingga delapan kali volume awal dan akan terdispersikan cukup lama sehingga sulit untuk disedimentasi. Karena kemampuan mengembangnya, maka sodium bentonit dapat digunakan sebagai *sealant*, khususnya untuk menutup sistem pembuangan *subsurface* terhadap bahan bakar

nuklir dan untuk mengkarantina logam pengotor pada air bawah tanah. Selain itu, karena sifat koloidnya yang sangat baik, Na-bentonit juga terkadang digunakan dalam lumpur bor pada sumur minyak dan gas serta lempung jenis ini digunakan pula sebagai pencegah kebocoran dalam suatu bangunan sipil basah (dam/bendungan), bahan campuran dalam pembuatan cat, lateks, tinta cetak dan lain – lain. Struktur bentonit dapat ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Struktur dari Bentonit

Tipe Bentonit lainnya adalah *non-swelling* atau *calcium bentonite* yang lebih banyak kandungan Ca^{2+} pada interlayernya. Ca-bentonit biasa digunakan sebagai bahan pemucat warna, industri farmasi, katalisator, penjernih minyak goreng serta bahan perekat pasir cetak dalam pengecoran baja, serta dalam

pembuatan pellet – pellet makanan ternak. Dengan penambahan zat kimia pada kondisi tertentu, Ca-bentonit dapat dimanfaatkan sebagai bahan lumpur bor setelah melalui pertukaran ion, sehingga terjadi perubahan menjadi Na-bentonit dan diharapkan terjadi peningkatan sifat reologi dari suspensi mineral tersebut agar mencapai persyaratan sebagai bahan lumpur sesuai dengan spesifikasi standar.

Endapan bentonit di Indonesia tersebar di Pulau Jawa, Pulau Sumatra serta sebagian Pulau Kalimantan dan Pulau Sulawesi. Umumnya bentonit yang ada di Indonesia merupakan Ca-bentonit (Klein dan Hurlbut, 1993).

2.2 Cesium (Cs-137)

Cesium merupakan logam yang sangat reaktif secara kimiawi. Cesium sangat reaktif terutama ketika bereaksi dengan air akan terbentuk basa dengan pelepasan kalor yang sedemikian besar sehingga bereaksi dengan hidrogen yang dilepaskan dalam proses tersebut. Sifat-sifat fisik cesium antara lain berwarna putih keperakan, lunak dan segera meleleh pada suhu kamar, titik didih 685°C, titik leleh 529°C, massa jenis padatnya pada suhu 17°C adalah 1892 kg/m³ dan massa jenis cairnya pada suhu 40°C adalah 1827 kg/m³. Cesium adalah logam berat dari semua logam alkali dengan nomor atom 55. Sifat kimia cesium mirip dengan kalium dan rubidium. Cesium-137 merupakan salah satu isotop cesium yang bersifat radioaktif dengan memancarkan partikel β dan γ untuk mencapai kestabilannya. Energi partikel β yang dipancarkan sebesar 0,523 MeV dan 1,19 MeV, sedangkan partikel γ mempunyai energi 0,6043 MeV.

Cesium-137 dihasilkan dari reaksi fisi bahan bakar reaktor nuklir, jumlah yang dihasilkan tergantung dari tipe bahan bakar, jumlah neutron dan jumlah energi panas yang dihasilkan. Cesium-137 yang berasal dari reaksi fisi akan dapat masuk ke dalam komponen lingkungan dan dapat terakumulasi dalam komponen lingkungan tersebut (Syafei, 2013).

2.3 Multi Channel Analyzer (MCA)

Spektrometer gamma adalah suatu peralatan elektronik yang dapat menghasilkan spektrum gamma dari suatu sampel radioaktif yang sedang diukur. Sistem spektrometer gamma berfungsi untuk menganalisis sumber radiasi gamma atau isotop dengan mengukur distribusi energinya dan aktivitasnya. Nilai energi spektrometer gamma sebanding dengan tinggi pulsa dan aktivitasnya. Sistem ini banyak digunakan sebagai komponen utama untuk memilih isotop dan mengetahui distribusinya dalam organ tubuh tertentu pada instrumentasi nuklir bidang kedokteran, sedangkan di industri digunakan untuk otomatisasi dan *quality control* dalam suatu proses produksi (Wardana, 2004).

Pada Gambar 5 merupakan contoh unit *Multi Channel Analyzer (MCA)* yang dipakai. Pada penelitian ini spektrometer gamma merupakan salah satu teknik paling baik dan bermanfaat untuk menganalisis radioisotop untuk berbagai macam sampel, karena hasil pembacaan energi sinar gamma bersifat diskrit dan unik untuk setiap radionuklida.



Gambar 5. Alat *Multi Channel Analyzer* (MCA) Spektrometer Gamma

Spektrometer gamma mempunyai banyak kegunaan lain, yaitu:

1. Dapat menganalisis radionuklida yang berbeda-beda secara simultan dan individual pada sampel yang sama.
2. Tidak memerlukan prosedur kimia yang rumit dan mudah dalam menyiapkan sampel.
3. Tingkat validasi yang tinggi karena nilai perkiraan yang stabil dan proses konfirmasi data menggunakan komputer.
4. Dapat mengukur tingkat radioaktivitas yang rendah, seperti sampel dari lingkungan.

Detektor semikonduktor Germanium merupakan detektor yang paling sering digunakan pada spektrometer gamma, misalnya untuk monitoring radioaktivitas, analisis aktivitas dan penelitian. Detektor ini memiliki resolusi energi yang tinggi (Zalewski dan Kobrzyńska, 2004).

Interaksi sinar gamma dengan detektor menghasilkan pulsa-pulsa. Pulsa-pulsa tersebut diproses secara elektronik melalui serangkaian peralatan yang disebut perangkat spektrometer gamma. Setelah itu, sebagai hasil akhir akan didapatkan suatu spektrum gamma.

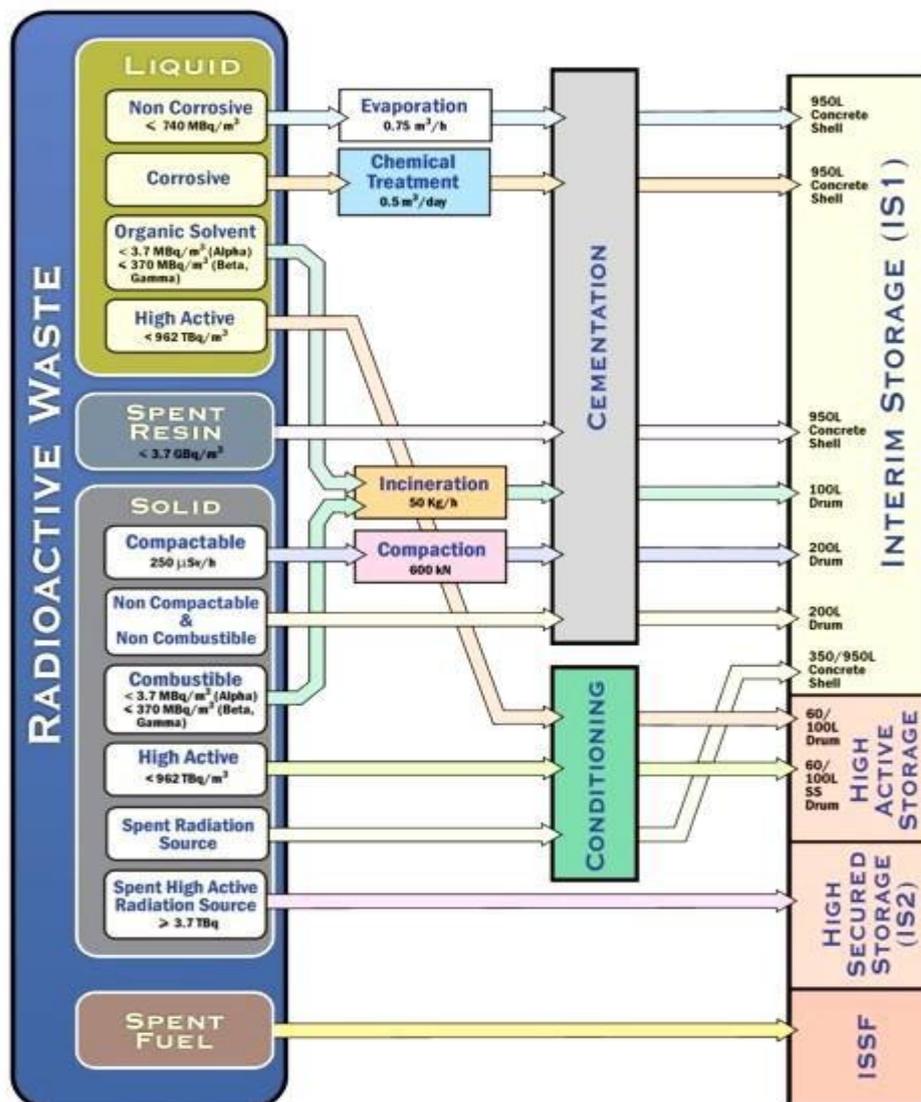
Analisis spektrometer gamma didasarkan pada interpretasi yang tepat dan benar atas spektrum gamma yang dihasilkan dari pengukuran. Untuk dapat membaca dan mengartikan spektrum gamma dengan benar, maka perlu diketahui terlebih dahulu proses pembentukan spektrum gamma dan gejala yang menyertainya.

Interaksi sinar gamma dengan detektor pada dasarnya sama dengan interaksi sinar gamma dengan materi. Ada tiga proses utama yang dapat terjadi, antara lain efek fotolistrik, hamburan Compton dan pembentukan pasangan. Melalui tiga proses ini, sinar gamma menyerahkan sebagian atau seluruh energinya pada materi detektor dan sebagai hasilnya dilepaskan elektron-elektron bebas yang dipergunakan dalam proses deteksi selanjutnya. Tinggi pulsa yang terbentuk sebanding dengan energi radiasi sinar gamma yang dideteksi (Susetyo, 1988).

2.4 Sistem Pembuangan Limbah Radioaktif

Limbah radioaktif dapat ditimbulkan dari operasi pembangkit listrik tenaga nuklir atau akibat penggunaan bahan radioaktif di industri, penelitian dan rumah sakit. Sudah lama diketahui bahwa faktor keselamatan dalam pengelolaan limbah radioaktif yang bertujuan untuk melindungi kesehatan manusia dan lingkungan berperan sangat penting (Marpaung, 2009).

Menurut Undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang ketenaganukliran dimana pada pasal 23 ayat (1) menyebutkan bahwa pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan oleh Badan Pelaksana, dalam hal ini Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR). Untuk mengemban tugas tersebut, maka PTLR memiliki Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) yang berfungsi untuk mengolah limbah radioaktif cair, semi cair, padat dan sumber bekas dari seluruh wilayah Indonesia dengan skema pengelolaan limbahnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengelolaan limbah radioaktif di PTLR

Pada Gambar 6 dijelaskan bahwa limbah radioaktif cair diolah dengan cara evaporasi dan konsentrat hasil evaporasi diimobilisasi dalam shell beton 950 L dengan campuran semen. Bila limbah cair bersifat korosif maka limbah diolah secara kimia (*chemical treatment*) sebelum diimobilisasi. Limbah cair organik dan limbah padat terbakar direduksi volumenya dengan cara insenerasi. Limbah padat termampatkan proses reduksi volumenya dilakukan dengan cara kompaksi dan hasil kompaksi selanjutnya diimobilisasi dalam drum 200 L. Limbah padat tak terbakar dan tak termampatkan pengolahannya dimasukkan secara langsung dengan cara imobilisasi dalam shell beton 350 L/950 L (Aisyah, 2011).

Limbah radioaktif (LRA) yang dihasilkan dari suatu aplikasi atau fasilitas teknologi nuklir harus diolah dengan baik dan benar agar tidak menyebarkan kontaminan ke lingkungan sekitar. Limbah tersebut akan diolah menjadi suatu paket limbah radioaktif agar menjadi stabil dan aman pada proses pengolahan selanjutnya. Limbah radioaktif tersebut setelah diolah dan diberi wadah (drum atau *shell*), selanjutnya akan disimpan pada fasilitas penyimpanan sementara (IS, *interim storage*) sebelum paket-paket tersebut dikirim ke suatu fasilitas penyimpanan akhir (pembuangan).

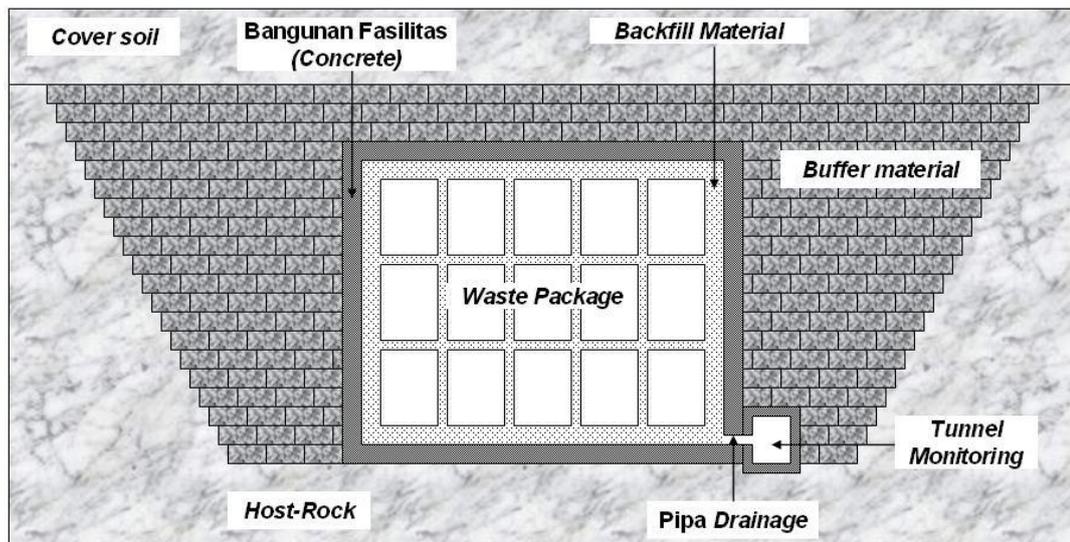


Gambar 7. Paket Limbah Drum dan *Shell*

Pada Gambar 7 di atas dapat di lihat perbedaan antara drum dan *shell* selain wadahnya yang terbuat dari *stainless steel* dan beton, wadah *shell* dibuat untuk limbah radioaktif dengan aktivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan drum. Pengolahan limbah radioaktif aktivitas rendah dengan cara reduksi volume dan immobilisasi dengan matriks semen adalah untuk mengungkung dan mengurangi dosis paparan limbah. Limbah akan berkurang volumenya dan juga dosis paparannya sehingga lebih aman dan selamat dalam penyimpanannya di *Interim Storage*. Pengolahan dengan cara ini prosesnya lebih sederhana dan lebih ekonomis walaupun kemampuan reduksi volume tidak begitu besar dibandingkan dengan proses insenerasi (Tomo, 2010).

Pada fasilitas penyimpanan limbah radioaktif (termasuk pada sistem tanah dangkal) digunakan sistem keselamatan berlapis untuk meminimalisir adanya dampak sebaran radionuklida ke lingkungan. Salah satu material yang digunakan adalah lempung bentonit dan kaolin. Secara prinsip, bentonit dan kaolin digunakan sebagai penyangga untuk menunda terjadinya kontak antara air tanah dan paket limbah, juga dapat berperan sebagai penyerap radionuklida (RN) yang “lepas” dari paket limbah bersama dengan aliran air tanah. Adanya intrusi air tanah ke dalam sistem penyimpanan limbah radioaktif yang berisi paket limbah dapat menyebabkan wadah paket/drum menjadi rusak sehingga menyebabkan RN yang ada di paket limbah akan larut dan ikut hanyut bersama air tanah “keluar” ke lingkungan. Bentonit dan kaolin sebagai salah satu penghalang buatan yang diletakkan disekeliling PLRA akan berperan untuk menghalangi penyebaran RN ke lingkungan secara sorpsi agar RN yang terlepas tersebut tidak ikut menyebar ke lingkungan bersama air tanah.

Penyimpanan akhir limbah radioaktif merupakan sistem terintegrasi fasilitas penyimpan limbah radioaktif yang tersusun atas 2 sistem penghalang (*barrier*) berlapis yang dikenal sebagai *multibarrier system* (sistem penghalang berlapis), agar kemungkinan adanya lepasan radionuklida dari paket limbah radioaktif dapat terisolasi dan terhambat sehingga tidak dapat tersebar luas ke lingkungan. Sistem penghalang berlapis tersusun dari (1) penghalang alami (*natural barrier*) dan (2) penghalang buatan (*engineered barrier*) yang terdiri dari (a) matrik dan wadah limbah, (b) bahan isian (*backfill*), (c) konstruksi pendukung, (d) penyangga dan penghalang alami (*natural barrier*) berupa tanah atau batuan lokasi (*host rock*) tempat fasilitas pembuangan tersebut berada (Brookins, 1986). Sistem penghalang ini berfungsi untuk mengisolasi radionuklida dari lingkungan juga untuk menghambat dan mengontrol laju aliran air tanah ke dan dari fasilitas penyimpanan limbah radioaktif (Lindblom dan Gnirk, 1982). Sistem penghalang berlapis dapat dilihat pada Gambar 8 di bawah ini :



Gambar 8. Sistem penghalang berlapis pada salah satu fasilitas PLRA jenis dekat permukaan (Susilowati dkk., 2011)

Bentonit dan Kaolin merupakan bahan penyangga yang merupakan salah satu sub-sistem penghalang buatan dalam sistem penyimpanan akhir limbah radioaktif (PA – LRA).

2.5 Fenomena Penyerapan (Sorpsi)

Secara umum peristiwa sorpsi atau adsorpsi yang terjadi pada larutan terbagi atas dua bagian yaitu adsorpsi fisika dan adsorpsi kimia. Adsorpsi fisika merupakan adsorpsi yang disebabkan oleh gaya *Van der Waals* yang ada pada permukaan adsorben, panas adsorben biasanya rendah dan terjadi di lapisan pada permukaan adsorben yang umumnya lebih besar dari satu mol. Adsorpsi kimia adalah adsorpsi yang terjadi karena adanya reaksi antara zat yang diserap dan adsorben, lapisan molekul pada permukaan adsorben hanya satu lapis dan panas adsorpsinya tinggi.

Kinetika adsorpsi menyatakan adanya proses penyerapan suatu zat oleh adsorben dalam fungsi waktu. Adsorpsi terjadi pada permukaan zat padat karena adanya gaya tarik atom atau molekul pada permukaan zat padat. Molekul-molekul pada permukaan zat padat atau zat cair, mempunyai gaya tarik ke arah dalam, karena tidak ada gaya-gaya lain yang mengimbangi. Adanya gaya-gaya ini menyebabkan zat padat dan zat cair, mempunyai gaya adsorpsi. Adsorpsi berbeda dengan absorpsi. Pada absorpsi zat yang diserap masuk ke dalam absorben sedangkan pada adsorpsi zat yang diserap hanya terdapat pada permukaannya (Sukardjo, 1990).

Desorpsi adalah peristiwa pelepasan kembali bahan yang telah diserap oleh adsorben (Kirk dan Othmer, 1963). Desorpsi adalah kemampuan untuk zat kimia

bergerak dalam fase gerak. Semakin banyak bahan kimia desorbs, semakin kecil kemungkinan akan menyerap, sehingga bukan menempel pada fase diam tetapi bahan kimia bergerak naik dengan bagian depan pelarut.

Radionuklida dikontakkan dengan sampel untuk mempelajari interaksi sorpsi – desorpsinya, karena salah satu mekanisme yang penting dalam menghambat sebaran radionuklida ke lingkungan adalah faktor kemampuan serap dan pelambatan radionuklida dalam suatu bahan buffer pada fasilitas penyimpanan akhir (pembuangan). Menurut *M. Ding dkk, MV. Minorenko, dan WY. Um* parameter karakter sorpsi suatu bahan akan ditentukan oleh fungsi dari konsentrasi ion logam atau radionuklida dan kapasitas sorpsi dari batuan tersebut. Nilai sorpsi tanah atau batuan yang menyerap radionuklida ditunjukkan dengan nilai koefisien distribusi radionuklida (K_d) tersebut. Kinetika sorpsi dapat diperoleh dengan pengocokan larutan dengan sampel sampai diperoleh kondisi kesetimbangan. Pengukuran dapat dihitung koefisien distribusinya (K_d) dengan rumus:

$$K_d = \frac{\text{Banyaknya RN yang terserap di padatan}}{\text{Banyaknya RN yang tersisa di larutan}}$$

atau

$$K_d = \frac{A_o - A_t}{A_t} \frac{V}{m}$$

dimana :

A_o : aktivitas awal radionuklida di larutan

A_t : aktivitas akhir radionuklida di larutan

V : volume total larutan (mL)

m : massa sampel (g) dan

K_d : distribusi koefisien radionuklida pada sampel (mL/g)

Setelah diperoleh kinetika sorpsi kemudian kinetika desorpsi diperoleh dengan cara mengganti larutan yang mengandung radionuklida dengan larutan segar atau akuades. Campuran tersebut lalu dikocok kembali dan di sampling sampai diperoleh waktu kesetimbangan baru. Persamaan desorpsi dirumuskan sebagai berikut:

$$K_d = \frac{V \cdot A_0 - A_t (V + \Delta V)}{A_t \cdot m}$$

dimana ΔV adalah volume yang tertinggal setelah dekantasi (mL) (Um dan Papelis, 2003).

2.6 Pengaruh Konsentrasi NaCl dalam Larutan

Pengaruh ion logam yang ada di larutan terhadap reaksi sorpsi radiocesium oleh kaolin dan bentonit akan dipelajari. Ion Natrium sebagai pengatur kekuatan ion larutan diperkirakan akan berpengaruh terhadap sorpsi radiocesium oleh kaolin dan bentonit. Kaolin dan bentonit pada fasilitas penyimpanan akhir limbah radioaktif akan berperan sebagai bahan penyangga sedangkan radiocesium merupakan radionuklida acuan untuk penelitian tentang limbah radioaktif aktivitas rendah – sedang.

2.7 Pengaruh Konsentrasi CsCl

Pengaruh konsentrasi ion Cs pada sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit dilakukan dengan cara pengontakan kaolin dan bentonit dengan larutan yang mengandung CsCl dengan konsentrasi awal yang bervariasi, rentang konsentrasi awal Cs yang diberikan antara 10^{-8} hingga 10^{-4} M.

Parameter konsentrasi CsCl diperkirakan akan berpengaruh terhadap sorpsi radionuklida Cs oleh kaolin dan bentonit. Seiring meningkatnya konsentrasi CsCl diperkirakan akan menyebabkan terjadinya penurunan nilai koefisien distribusi, hal ini disebabkan terjadinya kejenuhan pada kaolin dan bentonit.

2.8 Pengaruh Penambahan Karbonat terhadap Sorpsi

Pengaruh penambahan karbonat pada sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit dilakukan dengan cara pengontakan kaolin dan bentonit dengan larutan yang mengandung variasi konsentrasi Natrium karbonat yaitu antara 10^{-8} , 10^{-6} , 10^{-4} M.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Instrumen Bidang Teknologi Penyimpanan Lestari, Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN Serpong - Tangerang. Penelitian ini berlangsung dari bulan Januari sampai April 2013.

3.2 Prosedur Kerja

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari wadah vial polietilen volume 20 mL, *Centrifuge (Labofuge 400 centrifuge Heraeus, 2500 rpm 10 min)*, neraca analitik (*Mettler Serie AE200*), alat analisis radiometrik unit *Multi Channel Analyzer (MCA) (Canberra)*, alat *roller* geologi, penggerus keramik (lumpang) dan ayakan 100 mesh (*Fritsch GmbH Brd-6850 Idar – Oberstein*). Gambar alat pada lampiran 7.

3.2.2 Bahan

Bahan – bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah larutan Cs-137 (*Eckert And Ziegler*) sebagai larutan standar radioaktif, larutan CsCl (*E. MERCK*) digunakan untuk penentuan pengaruh konsentrasi CsCl, larutan NaCl (*E. MERCK*) digunakan untuk penentuan pengaruh konsentrasi NaCl dalam larutan, larutan Na₂CO₃ (*E. MERCK*) digunakan untuk penentuan pengaruh penambahan

karbonat, serta sampel kaolin dan bentonit diambil dari Pulau Bangka Belitung dan Sumatera Barat sebagai bahan penyangga pada sistem pembuangan LRA.

3.2.3 Preparasi sampel

Kaolin dan bentonit dibersihkan dari kotoran, dikeringkan (dipanaskan dalam oven 100°C, 7 jam), digerus atau ditumbuk, diayak menjadi 100 mesh, dan dikeringkan di udara terbuka. Padatan kaolin dan bentonit yang dihasilkan itu kemudian disimpan dalam wadah plastik dan siap untuk digunakan (Lampiran 6). Kaolin dan bentonit ditimbang $\pm 0,1000$ gram kemudian dimasukkan ke dalam botol polietilen 20 mL.

3.2.4 Tempat Pengambilan Sampel dan Labeling

Dalam penelitian ini kaolin dan bentonit terdiri dari 5 lokasi yang diambil yaitu, untuk daerah Sumatera Barat diambil bentonit Pasaman diberi kode A, bentonit Pariaman diberi kode B, kaolin Ampang kualo (Solok) diberi kode C dan kaolin Lubuk Selasih (Solok) diberi kode D sedangkan daerah Pulau Bangka-Belitung diambil kaolin Membalong (Belitung) diberi kode E. Tiap sampel terdiri dari 29 botol polietilen dan diberi label dari no. 1 – 29. Misalnya, Sampel A dari no. 1- 10 untuk kinetika sorpsi, no. 11- 18 untuk kinetika desorpsi, no. 19- 21 untuk pengaruh konsentrasi NaCl, no. 22- 26 untuk pengaruh konsentrasi CsCl dan no. 27-29 untuk pengaruh penambahan karbonat dalam larutan.

3.2.5 Penentuan Kinetika Sorpsi

Pengukuran sorpsi dilakukan secara *batch*, dimana sebanyak $\pm 0,1000$ gram kaolin dan bentonit dalam 10 ml larutan yang mengandung CsCl 10^{-8} M dikontakkan dalam botol polietilen 20 ml. 1 ml larutan CsCl 10^{-7} M, 1 ml larutan Cs-137 dan 8 ml air yang dimasukkan ke dalam botol polietilen. Botol yang digunakan dengan nomor urut 1 sampai 10. Dari penentuan kinetika akan dapat ditetapkan waktu pengocokan (waktu kontak) saat dicapainya kesetimbangan, yang kemudian digunakan untuk penentuan parameter berikutnya. Variasi waktu pengocokan mulai dari hari pertama, 2 jam pertama selama 12 hari untuk kaolin dan mulai 2 jam pertama selama 19 hari untuk bentonit. Setiap harinya botol diambil dan dipindahkan ke botol baru. Fase cair dan padatnya dipisahkan dengan alat *centrifuge*. Fase cairnya kemudian di cacah dengan menggunakan alat *Multi Channel Analyzer* (MCA) untuk pengukuran radioaktivitas dan kuantifikasi serapan dilakukan dengan perhitungan koefisien distribusi (K_d), yaitu ratio konsentrasi radionuklida pada padatan dan dalam larutan, pada saat kesetimbangan (Lampiran 1).

3.2.6 Penentuan Kinetika Desorpsi

Pengukuran desorpsi dilakukan secara *batch*, dimana sebanyak $\pm 0,1000$ gram kaolin dan bentonit dalam 10 ml larutan yang mengandung CsCl 10^{-8} M dikontakkan dalam botol polietilen 20 ml. Botol yang digunakan dengan nomor urut 11 sampai 18. Larutan yang dimasukkan yaitu 1 ml CsCl 10^{-7} M, 1 ml Cs-137 dan 8 ml akuades. Waktu pengocokan dilakukan mulai dari hari pertama hingga 12 hari untuk kaolin dan hingga 19 hari untuk bentonit. Setelah

pengontakkan dalam waktu tertentu, fase cair dan padatnya dipisahkan dengan alat *centrifuge*. Kemudian, fasa cairnya dibuang dan diganti dengan akuades sebanyak 10 ml. Setiap botol kemudian diroller kembali mulai hari pertama, 2 jam pertama selama 12 hari untuk masing – masing kaolin dan bentonit. Setiap harinya botol diambil dan dipindahkan ke botol baru. Setelah itu, fase cair dan padatnya dipisahkan dengan alat *centrifuge*. Fase cairnya kemudian di cacah dengan menggunakan alat *Multi Channel Analyzer* (MCA) untuk pengukuran radioaktivitas dan dari hasil pengukuran dapat dihitung nilai koefisien distribusinya (Kd) (Lampiran 2).

3.2.7 Penentuan pengaruh konsentrasi NaCl dalam larutan

Sebanyak $\pm 0,1000$ gram kaolin dan bentonit dikontakkan dengan 10 ml larutan yang mengandung NaCl yang akan merepresentasikan kekuatan ion dalam larutan. Larutan NaCl yang digunakan dibuat pada konsentrasi 0,1 M, 0,5 M dan 1,0 M. Kaolin dan bentonit kemudian dikontakkan dengan larutan yang mengandung 1 ml CsCl 10^{-7} M, 8 ml NaCl dan 1 ml larutan Cs-137. Botol diurut dari no. 19 – 21. Pengocokan dilakukan dengan bantuan alat *roller*, selama waktu yang diperoleh dari penentuan kinetika sorpsi. Kaolin di *roller* selama 12 hari dan bentonit selama 19 hari. Setelah dikocok, padatan dan cairannya dipisahkan dengan alat *centrifuge*, dan filtratnya diukur untuk menentukan radioaktivitasnya dengan alat MCA, dan dari hasil pengukuran dapat dihitung nilai koefisien distribusinya (Kd) (Lampiran 3).

3.2.8 Penentuan pengaruh konsentrasi CsCl

Pada penentuan pengaruh konsentrasi CsCl, digunakan $\pm 0,1000$ gram kaolin dan bentonit dalam 10 ml larutan yang mengandung cesium yaitu 1 ml larutan Cs-137, 1 ml larutan CsCl dan 8 ml akuades. Konsentrasi CsCl yang digunakan bervariasi dari 10^{-8} , 10^{-7} , 10^{-6} , 10^{-5} dan 10^{-4} M. Botol diurut dari no. 22 – 26. Pengocokan dilakukan dengan bantuan alat *rolling shaker*, selama waktu yang diperoleh dari penentuan kinetika sorpsi. Kaolin diroller selama 12 hari dan bentonit selama 19 hari. Pemisahan fase padatan dan fase larutan dilakukan dengan bantuan alat *centrifuge*. Kemudian fase larutan digunakan untuk pengukuran radioaktivitas dengan MCA. Selanjutnya, dilakukan perhitungan nilai sorpsi dengan menghitung nilai koefisien distribusi (Kd) (Lampiran 4).

3.2.9 Penentuan pengaruh karbonat dalam larutan

Sebanyak $\pm 0,1000$ gram sampel kaolin dan bentonit dalam 1 ml larutan yang mengandung CsCl 10^{-7} M dikontakkan ke dalam masing - masing botol polietilen, kemudian diberi 1 ml larutan Cs-137 dan ditambahkan 8 ml larutan Natrium karbonat. Dengan variasi konsentrasi Natrium karbonat yang diberikan antara 10^{-8} , 10^{-6} dan 10^{-4} M. Botol diurut dari no. 27 – 29. Pengocokan dilakukan dengan bantuan alat *roller*. Untuk kaolin di *roller* selama 12 hari dan bentonit selama 19 hari. Setelah itu disentrifus, fase padat dan cairnya dipisahkan. Fase cair diukur aktivitasnya dengan MCA, dan dari hasil pengukuran dapat dihitung nilai koefisien distribusinya (Kd) (Lampiran 5).

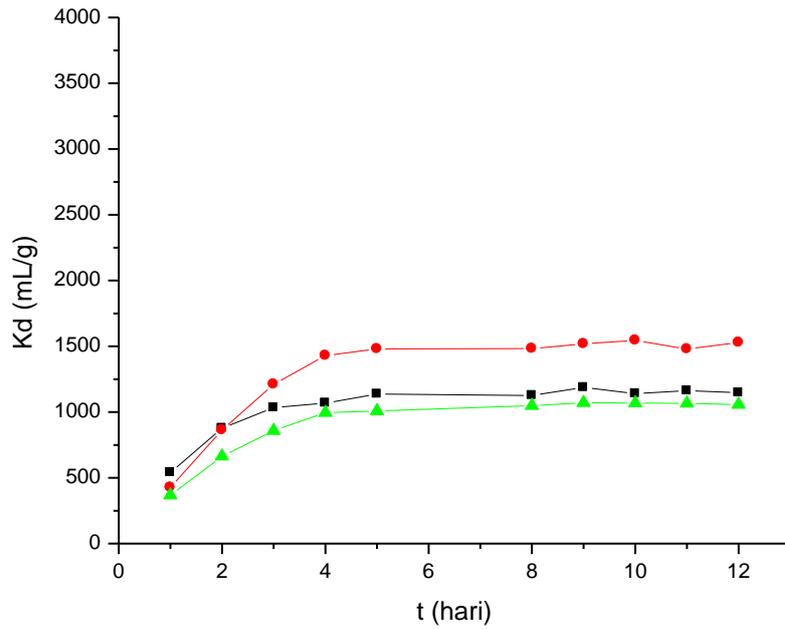
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

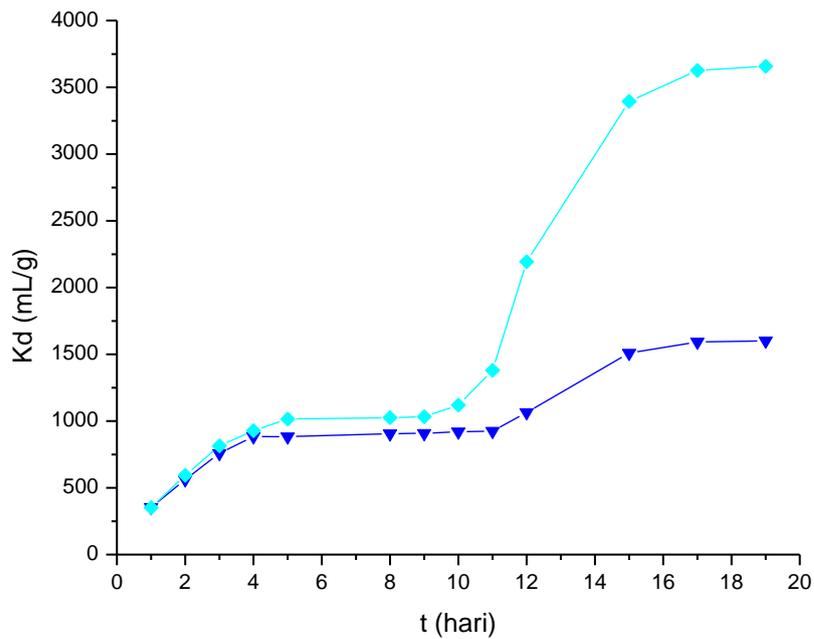
4.1 Kinetika Sorpsi – Desorpsi

Penentuan kinetika sorpsi dan desorpsi pada kaolin dan bentonit dilakukan untuk menentukan waktu kontak (kondisi setimbang) antara Cs-137 dengan sampel. Kaolin dikerjakan sebanyak 10 titik yang dilaksanakan dalam waktu 2 minggu. Sedangkan bentonit dikerjakan sebanyak 13 titik dalam waktu 3 minggu. Waktu penentuan untuk kaolin lebih cepat daripada bentonit karena kaolin hanya memiliki struktur dua lapisan (Klein dan Hurlbut, 1993). Kaolin yang digunakan pada penelitian ini berasal dari daerah Membalong (Belitung), Lubuk Selasih (Solok, Sumatera Barat) dan Ampang Kualo (Solok, Sumatera Barat) sedangkan bentonit berasal dari daerah Pasaman dan Pariaman, Sumatera Barat. Kinetika sorpsi dan desorpsi radiocesium diekspresikan melalui grafik antara koefisien distribusi (K_d) dengan waktu kontak (hari) dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Kinetika sorpsi merupakan proses penyerapan yang dilakukan oleh mineral alam terhadap radionuklida Cesium selama beberapa hari (Setiawan, 2010; Setiawan, 2011a). Dari penentuan ini diperoleh bahwa setiap sampel memiliki koefisien distribusi (K_d) yang berbeda namun memiliki waktu kontak yang sama. Radiocesium sorpsi oleh sampel kaolin dan bentonit telah mencapai kondisi setimbang setelah waktu kontak hari ke – 5.



(a)



(b)

Gambar 9. Distribusi Radiocesium Kinetika Sorpsi pada (a) kaolin, (-■-) kaolin Membalong, (-▲-) kaolin Ampang Kualo, (-●-) kaolin Lubuk Selasih (b) bentonit, (-▼-) bentonit Pasaman (-◆-) bentonit Pariaman terhadap fungsi waktu kontak

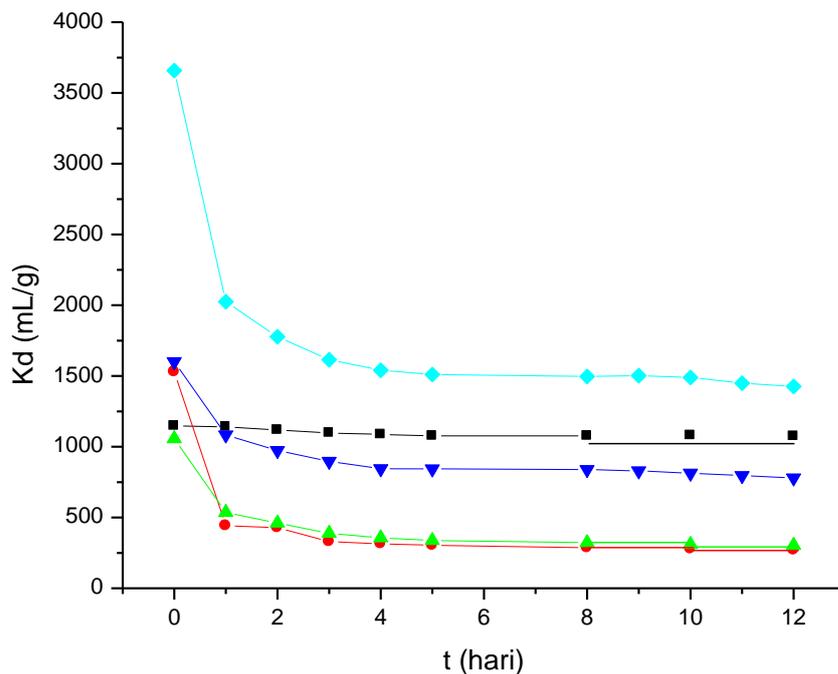
Pada Gambar 9 (a), kaolin yang paling banyak menyerap dapat ditentukan dengan cara nilai Kd yang semakin meningkat yaitu pada kaolin Lubuk Selasih sedangkan pada Gambar 9 (b), Kd sorpsi yang paling tinggi adalah bentonit Pariaman. Hal ini berarti secara *trend*, bentonit jauh lebih baik dibanding kaolin sehingga bentonit cocok digunakan sebagai bahan penyangga buatan pada sistem pembuangan limbah radioaktif.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, bentonit jauh lebih lama sorpsinya (16 hari) dibandingkan dengan kaolin (140 jam) karena bentonit menghasilkan 2 grafik yang melandai pada hasil kinetika sorpsi Cs (Setiawan dkk., 2011; Setiawan, 2010). Hal ini disebabkan karena bentonit merupakan jenis lempung yang struktur kristalnya terdiri dari tiga lapis. Dimana, satu lapisan berbentuk oktahedral dan dua lapisan berbentuk tetrahedral oleh silika dan oksigen. Lapisan ini akan menyatu dengan ujung-ujung kisi tetrahedral silika membentuk lapisan dengan lapisan hidroksil dari oktahedral yang akhirnya akan membentuk lapisan 3 *layer* mineral bentonit dengan susunan: tetrahedral-oktahedral-tetrahedral. Mineral bentonit akan sangat baik untuk sorpsi ion-ion logam karena mempunyai ukuran partikel yang sangat kecil serta mempunyai kapasitas penukaran ion yang baik antara ion-ion logam dengan ion-ion Ca atau Na dari bentonit (Setiawan., dkk, 2011).

Sorpsi radiocesium oleh bentonit terjadi dalam dua tahap, dimana tahap pertama ion Cs akan mengisi kisi tetrahedral sampai jenuh kemudian ion Cs sisanya melakukan kontak dengan kisi oktahedral sehingga dalam grafik ini dapat terlihat seperti ada 2 tahapan penyerapan (Setiawan., dkk, 2011). Pada Gambar 9 (b), penyerapan pertama mulai terlihat jenuh pada hari ke – 5, sedangkan

penyerapan ke - 2 terlihat jenuh setelah waktu kontak pada hari – 17 dengan nilai Kd mencapai sekitar 3700 mL/g. Nilai Kd sorpsi radiocesium pada masing sampel di hari ke – 5 untuk kaolin Membalong; Lubuk Selasih dan Ampang Kualo serta bentonit Pariaman dan Pasaman masing – masing adalah 1150 mL/g ; 1500 mL/g ; 1000 mL/g ; 900 mL/g ; 1000 mL/g masing – masing pada konsentrasi CsCl 10^{-8} M. Cepatnya reaksi sorpsi terhadap mineral karena terjadinya pertukaran ion antar sampel.

Kinetika desorpsi merupakan proses pelepasan Cs-137 kembali ke larutan terhadap mineral yang telah menyerap radionuklida dengan cara mengganti air radioaktif dengan akuades kemudian di *roller* selama beberapa hari, sehingga didapat kondisi setimbang yang baru (Setiawan, 2010 ; Setiawan, 2011a).



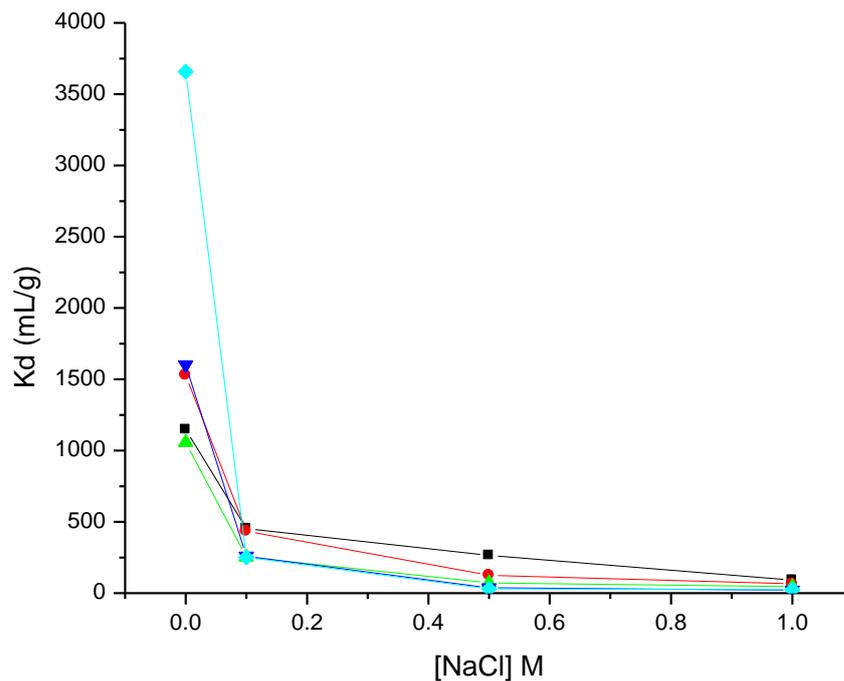
Gambar 10. Distribusi Radiocesium pada Kinetika Desorpsi untuk setiap kaolin dan bentonit terhadap fungsi waktu kontak, (-■-) kaolin Membalong (-▲-) kaolin Ampang Kualo(-●-) kaolin Lubuk Selasih (-▼-) bentonit Pasaman (-◆-) bentonit Pariaman

Dari kondisi setimbang, dapat diketahui bahwa reaksi sorpsi radiocesium terjadi relatif cepat dibandingkan dengan desorpsi. Gambar 10, pada kondisi ini reaksi berlangsung *reversible*. Hal ini dapat dilihat pada Gambar, untuk kinetika sorpsi nilai Kd semakin meningkat sedangkan nilai Kd desorpsi semakin menurun dan terus konstan pada hari berikutnya. Kd radiocesium desorpsi menurun karena sebagian dari radiocesium lepas kembali ke dalam larutan akuades dan sehingga jumlah radiocesium pada sampel lebih rendah dari sebelumnya. Dengan demikian, hari ke- 8 merupakan waktu yang cukup untuk mencapai kondisi setimbang (Setiawan, 2010). Hasil dari waktu kontak yang diperoleh akan digunakan sebagai waktu acuan untuk pengontakan pada parameter selanjutnya (Setiawan, 2011b).

Nilai Kd desorpsi radiocesium pada hari ke – 8 untuk masing – masing sampel; kaolin Membalong, Lubuk Selasih dan Ampang Kualo serta bentonit Pariaman dan Pasaman masing – masing adalah 1000 mL/g ; 300 mL/g ; 350 mL/g ; 850 mL/g ; 1500 mL/g masing – masing pada konsentrasi CsCl 10^{-8} M. Range nilai Kd yang diperoleh berkisar 1000 – 3700 mL/g dan 300 – 1500 mL/g untuk sorpsi dan desorpsi secara berurutan masing – masing pada konsentrasi CsCl 10^{-8} M.

4.2 Pengaruh Konsentrasi NaCl dalam Larutan

Pengaruh konsentrasi NaCl dalam larutan sebagai pengaruh kekuatan ion (*ionic strength*) larutan terhadap sorpsi Cs oleh kaolin dan bentonit, hasilnya ditunjukkan pada Gambar 11. Pada Gambar tersebut, konsentrasi larutan garam (NaCl) yang semakin meningkat akan menurunkan nilai Kd yang diperoleh. Konsentrasi NaCl yang diberikan adalah 0; 0,1; 0,5; dan 1,0 M NaCl.



Gambar 11. Pengaruh konsentrasi NaCl terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel, (-■-) kaolin Membalong (-▲-) kaolin Ampang Kualo (-●-) kaolin Lubuk Selasih (-▼-) bentonit Pasaman (-◆-) bentonit Pariaman

Peningkatan kekuatan ion dalam larutan ditunjukkan dengan meningkatnya konsentrasi NaCl dalam larutan dan nilai Kd yang semakin menurun. Persaingan antara radiocesium dan NaCl dapat dilihat pada masing – masing sampel. Ion natrium yang ada dalam larutan segera menetralkan ion - ion negatif dari sampel kaolin dan bentonit, dan menghambat interaksi radiocesium dengan sampel tersebut. Hal ini telah mengakibatkan terjadinya kompetisi antara ion radiocesium dan Na di sekitar sampel. Dalam konsentrasi yang lebih tinggi dari NaCl, radiocesium akan terhambat ke kaolin dan bentonit, hal ini diakibatkan adanya persaingan dengan ion logam dalam larutan. Kekuatan elektrostatik bekerja di daerah sekitar sampel yang disebabkan oleh perubahan kekuatan ion larutan, sehingga mengakibatkan penurunan selektivitas ion logam ke *site* pertukaran yang

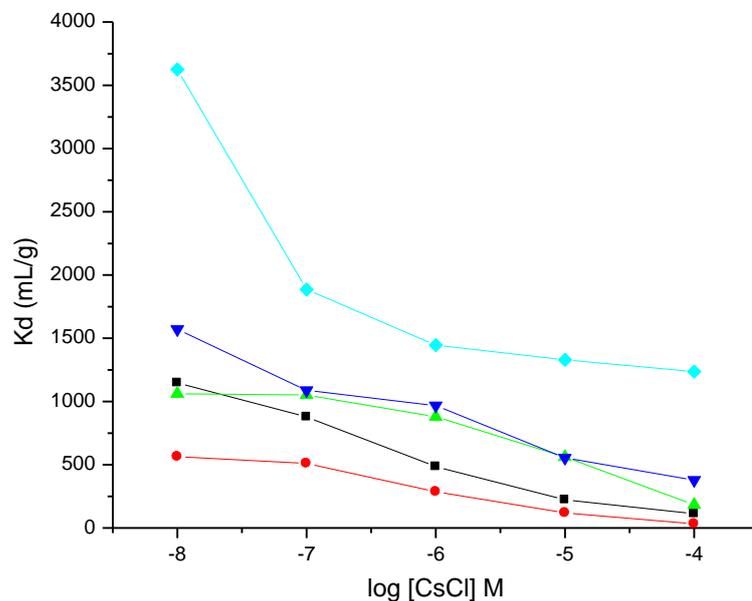
ada pada sampel kaolin dan bentonit (Setiawan, 2010; Setiawan dkk., 2011; Syafei dkk., 2013).

Urutan kekuatan ion pada masing-masing sampel yang ditunjukkan pada Gambar 11 yaitu sebagai berikut : kaolin Membalong > kaolin Lubuk Selasih > kaolin Ampang Kualo > bentonit Pariaman > bentonit Pasaman dengan nilai Kd yang semakin menurun.

4.3 Pengaruh Konsentrasi CsCl

Perubahan nilai Kd terjadi disepanjang rentang konsentrasi awal CsCl dilarutkan setelah dilakukan pengontakkan selama 12 hari untuk sorpsi kaolin dan 19 hari untuk bentonit. Pengaruh konsentrasi awal ion Cs dalam larutan *versus* nilai Kd dengan konsentrasi yang diberikan 10^{-8} sampai 10^{-4} M CsCl ditunjukkan pada

Gambar 12.



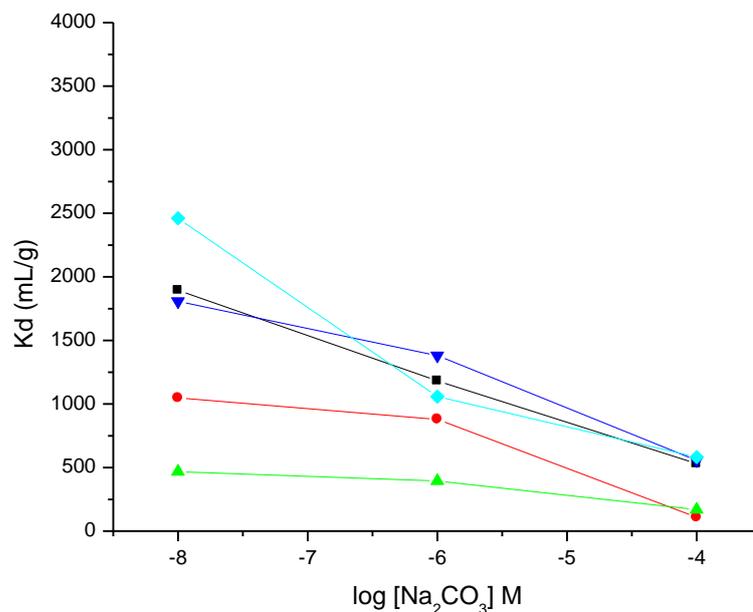
Gambar 12. Pengaruh konsentrasi CsCl terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel, (-■-) kaolin Membalong (-▲-) kaolin Ampang Kualo (-●-) kaolin Lubuk Selasih (-▼-) bentonit Pasaman (-◆-) bentonit Pariaman

Nilai K_d terlihat menurun seiring dengan bertambahnya konsentrasi awal ion Cs di larutan pada setiap sampel (kaolin dan bentonit). Nilai K_d menurun secara nyata karena keterbatasan kapasitas serap ion logam oleh sampel, dimana hal ini sangat sesuai dengan falsafah K_d yaitu konsentrasi Cs yang ada di larutan akan diserap oleh sampel sampai kapasitas tersebut menjadi jenuh.

Adanya peningkatan konsentrasi Cs di larutan akan menaikkan jumlah Cs yang tersisa di larutan yang pada akhirnya akan menurunkan koefisien distribusi dari Cs pada sampel (Setiawan,dkk, 2011; Setiawan, 2011c).

4.4 Pengaruh Karbonat dalam Larutan

Pengaruh konsentrasi ion karbonat terhadap sorpsi radiocesium dalam larutan pada sampel kaolin dan bentonit dapat ditunjukkan oleh Gambar 13. Dimana, nilai K_d terlihat menurun dengan semakin meningkatnya konsentrasi karbonat. Variasi konsentrasi Natrium karbonat yang diberikan adalah 10^{-8} ; 10^{-6} ; dan 10^{-4} M.



Gambar 13. Pengaruh konsentrasi karbonat terhadap sorpsi radiocesium pada setiap sampel, (-■-) kaolin Membalong (-▲-) kaolin Ampang Kualo (-●-) kaolin Lubuk Selasih (-▼-) bentonit Pasaman (-◆-) bentonit Pariaman

Dari Gambar 13 terlihat nilai K_d pada konsentrasi 10^{-8} M Na_2CO_3 naik, kemudian dengan penambahan konsentrasi karbonat menjadi 10^{-6} M, nilai K_d menurun, karena konsentrasi karbonat yang semakin meningkat menyebabkan radiocesium yang ada dalam larutan bereaksi dengan Natrium karbonat membentuk Cesium karbonat (Cs_2CO_3), maka dari itu nilai K_d yang dihasilkan semakin menurun dengan penambahan Natrium karbonat. Akan tetapi, belum ada penjelasan yang menunjukkan bahwa nilai K_d dapat menurun karena penambahan konsentrasi karbonat (Sastrowardoyo, 2008; Material Safety Data Sheet). Selain itu, ion Na dalam larutan dapat mempengaruhi kemampuan sorpsi terhadap sampel bahan alam lokal tersebut (Setiawan, 2010).

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Penelitian mengenai interaksi penyerapan Cs-137 oleh bahan alam lokal (kaolin dan bentonit) sebagai calon bahan penyangga pada sistem pembuangan limbah radioaktif telah dilakukan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondisi setimbang pada pengontakkan sampel kaolin dan bentonit telah dicapai dalam hari ke -5 dan hari ke -8, berturut – turut untuk sorpsi dan desorpsi.

Nilai Kd yang diperoleh berkisar 1000 – 3700 mL/g dan 300 – 1500 mL/g untuk sorpsi dan desorpsi secara berurutan masing – masing pada konsentrasi CsCl 10^{-8} M. Pengaruh konsentrasi NaCl pada masing – masing sampel kaolin dan bentonit mengalami penurunan nilai Kd dengan meningkatnya konsentrasi NaCl. Hal ini dikarenakan adanya kompetisi antara garam Na dengan Cs dalam larutan. Adanya peningkatan konsentrasi CsCl di larutan akan menaikkan jumlah Cs yang tersisa di larutan yang pada akhirnya akan menurunkan koefisien distribusi dari Cs pada sampel. Pengaruh karbonat menyebabkan nilai Kd menurun dengan semakin meningkatnya konsentrasi karbonat.

5.2 Saran

Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan untuk pendirian sarana penyimpanan akhir limbah radioaktif di Kawasan Nuklir Serpong dan sebagai pertimbangan pada rancang – bangun fasilitas disposal limbah radioaktif NSD (*Near Surface Disposal*) di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN,

sehingga fasilitas tersebut akan layak sebagai tempat penyimpanan akhir limbah radioaktif dan sarana untuk mendemonstrasikan kemampuan rancang-bangun suatu fasilitas disposal dan untuk penelitian selanjutnya, dapat dilakukan karakterisasi pada bentonit dan kaolin dalam mengetahui komposisi kimianya dengan analisa XRD dan mengukur nilai kapasitas tukar kation pada setiap sampel untuk menentukan sampel tersebut baik atau tidak bila digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Aisyah. 2011. Perubahan Struktur Mikro Dan Sifat Mekanik Pada Pengelasan Drum Baja Karbon Wadah Limbah Radioaktif. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14 (2). 14-30.
- Anonim. 2012. *Potensi Bahan Mineral di Sumatra Barat*. Badan Koordinasi Penanaman Modal (BKPM). Jakarta.
- Brookins, D.G. 1986. *Geochemical Aspects of Radioactive Waste Disposal*, Springer-Verlag, N.Y.
- Chapman, N and IG. Mc. Kinley. 1985. *The Geological Disposal of Nuclear Waste*. John Wiley & Sons. Chichester.
- Ding, M., P.W. Reimus., W. Lukens., S. Chipera and C. Scism. 2006. Sorption Characteristics of Radionuclides on Clays in Yucca Mountain Alluvium. Presented to 2006 IHLRWM, April 30 - May 4. Las Vegas. Nevada.
- Kirk and Othmer. 1963. *Encyclopedia of Chemical Technology Volume 1-22*. John Wiley & Sons, Inc. New York. London.
- Klein, C and C.S. Hurlbut. 1993. *Manual of Mineralogy*. 21sted. John Wiley and Sons. Inc. New York.
- Lindblom, U and P. Gnirk. 1982. *Nuclear Waste Disposal*. Pergamon Press. New York.
- Marpaung, T. 2009. Kajian Pengelolaan Limbah Radioaktif Sumber Terbungkus Berdasarkan Rekomendasi Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA). Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah VIII. Pusat Pengembangan Pengelolaan Limbah Radioaktif-BATAN.
- Material Safety Data Sheet. SC-252557. *Cesium Carbonate*. Section 1- Chemical Product and Company Identification.
- Mironenko, MV. 2004. *Experimental Study of Sorption of Np(V) on Kaolinite*, Herald of the Department of the Earth Sciences RAS.
- Sastrowardoyo, P.B. 2008. Serapan Cesium dan Strontium Pada Na-Bentonit. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah VI.
- Setiawan, B. 2010. Sorption Characteristics Of Radiocesium Onto Kaolinite Typed Clay. Proceedings of the Third International Conference on Mathematics and Natural Sciences (ICMNS 2010) – ITB. Bandung. 447-454.

- Setiawan, B. 2011a. Sorpsi Radionuklida Cs-137 Oleh Batulempung Formasi Daerah Subang Sebagai Wilayah Potensial Untuk Penyimpanan Lestari Limbah Radioaktif. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX. 251-256.
- Setiawan, B. 2011b. Paramater – Parameter Penting Pada Interaksi Radiocesium Dengan Bentonit. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14(1). 42-48.
- Setiawan, B. 2011c. Penentuan Kd Radionuklida Acuan Cs-137 Oleh Tanah Lokasi SP4 Di Kawasan Nuklir Serpong. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14(2). 43-49.
- Setiawan, B., H. Sriwahyuni., N.E. Ekaningrum dan T. Sumantry. 2011. Sorpsi Radiocesium Pada Bentonit Asal Cirangga-Bogor : Pengaruh waktu kontak, Konsentrasi Cs dan Kekuatan Ionik Larutan. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 14(2). 50-55.
- Sukardjo. 1990. *Kimia Anorganik*. Rineka Cipta. Jakarta.
- Suryanto. 1997. Radionuklida Acuan Pada Analisis Keselamatan Penyimpanan Limbah Radioaktif. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, PTPLR-BATAN. 138-142.
- Susetyo, W. 1988. *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron*. Gajah Mada University Press. Yogyakarta.
- Susilowati, D., Sucipta dan D. Suganda. 2011. Konsep Desain Fasilitas *Demo-Plant* Penyimpanan Limbah Radioaktif Dekat Permukaan (*Near Surface Disposal*) Di Kawasan Nuklir Serpong. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah IX. 257-264.
- Syafei, O.M., B. Setiawan., dan Safni. 2013. Interaksi Radiostronsium dengan Tanah Calon Tapak Fasilitas Demo Disposal di Serpong. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 16(1). *In printing*.
- Tomo, B. 2010. Pengolahan Limbah Radioaktif Hepa Filter Menggunakan Metode Reduksi Volume dan Imobilisasi dengan Matriks Semen. Prosiding Seminar Nasional VI. SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta. 609–614.
- Um, WY and C. Papelis. 2003. Sorption Mechanisms of Sr and Pb on Zeolitized Tuffs From The Nevada Test Site as a Function of pH and Ionic Strength, *American Mineralogist*, 88. 2028–2039.
- Wardana, W.A. 2004. *Aplikasi Teknologi Nuklir*. Andi offset. Yogyakarta.
- Zalewski, K and K. Szymczyk-Kobrzyńska. 2004. Radiocesium Contamination of Red Deer (*Cervus Elaphus*). Olsztyn-Kortowo.

Lampiran 1. Penentuan Koefisien Distribusi (Kd) pada Kinetika Sorpsi

Data Perhitungan Hasil Cacah (Count) tiap – tiap sampel sebanyak volume 10 ml

No.	Jenis sampel	Hari	Massa (g)	Co	Count (Ct)	(Co-Ct)/Ct	Kd = (Co-Ct)/Ct*V/m		
1	Kaolin Membalong	1	0.1003	5658	880	5	541		
		2	0.1002	5658	578	9	877		
		3	0.1002	5658	498	10	1034		
		4	0.0999	5658	485	11	1068		
		5	0.0999	5658	458	11	1137		
		8	0.0998	5658	462	11	1127		
		9	0.0997	5658	441	12	1187		
		10	0.1001	5658	456	11	1140		
		11	0.1001	5658	448	12	1162		
		12	0.0999	5658	454	11	1147		
		2	Kaolin Lubuk Selasih	1	0.0997	17491	3329	4	427
				2	0.0999	17491	1817	9	863
3	0.0999			17491	1335	12	1211		
4	0.0999			17491	1145	14	1429		
5	0.1001			17491	1106	15	1480		
8	0.1001			17491	1104	15	1483		
9	0.0997			17491	1084	15	1518		
10	0.1001			17491	1062	15	1545		
11	0.1001			17491	1107	15	1479		
12	0.1			17491	1074	15	1529		
3	Kaolin Ampang Kualo			1	0.1002	17491	3729	4	368
				2	0.0997	17491	2295	7	664
		3	0.1002	17491	1820	9	859		
		4	0.0998	17491	1600	10	995		
		5	0.1001	17491	1577	10	1008		
		8	0.1002	17491	1520	11	1049		
		9	0.1001	17491	1492	11	1071		
		10	0.0999	17491	1499	11	1068		
		11	0.0997	17491	1504	11	1066		
		12	0.1003	17491	1507	11	1057		
		4	Bentonit Pasaman	1	0.1002	17491	3849	4	354
				2	0.1001	17491	2639	6	562
3	0.1001			17491	2034	8	759		
4	0.0998			17491	1780	9	884		
5	0.0998			17491	1782	9	883		
8	0.0998			17491	1742	9	906		
9	0.0999			17491	1736	9	908		

		10	0.1002	17491	1711	9	920
		11	0.1001	17491	1705	9	925
		12	0.0999	17491	1503	11	1065
		15	0.1	17491	1087	15	1509
		17	0.1	17491	1033	16	1593
		19	0.0999	17491	1029	16	1601
5	Bentonit Pariaman	1	0.1	17491	3873	4	352
		2	0.1001	17491	2518	6	594
		3	0.1	17491	1913	8	814
		4	0.1	17491	1702	9	928
		5	0.1003	17491	1564	10	1015
		8	0.1003	17491	1549	10	1026
		9	0.0999	17491	1545	10	1033
		10	0.0997	17491	1439	11	1119
		11	0.0999	17491	1183	14	1380
		12	0.0998	17491	764	22	2194
		15	0.0999	17491	501	34	3395
		17	0.1001	17491	469	36	3626
		19	0.1001	17491	465	37	3658

Misalnya, diketahui :

- Kaolin Ampang Kualo, massa 0.1002 g
- Hari ke - 1, Co = 17491; Ct = 3729; V = 10 mL

$$Kd = \frac{(Co-Ct)}{Ct} \frac{V}{m} = \frac{(17491-3729)}{3729} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1002 \text{ g}}$$

$$= \frac{13762}{3729} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1002 \text{ g}} = 368,3167 \frac{\text{mL}}{\text{g}} = 368 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

Lampiran 2. Penentuan Koefisien Distribusi (Kd) pada Kinetika Desorpsi

Data Perhitungan Hasil Cacah (Count) tiap – tiap sampel sebanyak volume 10 ml

No.	Jenis sampel	Hari	Massa (g)	Co	Count (Ct)	*) CS	$X = (Co - (CS+Ct)) / (CS+Ct)$	Kd = $X * V / m$			
1	Kaolin Membalong	1	0.0998	5658	7	450	11.38074	1140			
		2	0.0999	5658	15		11.16774	1118			
		3	0.0999	5658	23		10.96195	1097			
		4	0.0997	5658	28		10.83682	1087			
		5	0.1	5658	31		10.76299	1076			
		8	0.1	5658	31		10.76299	1076			
		10	0.0999	5658	30		10.7875	1080			
		12	0.1002	5658	31		10.76299	1074			
2	Kaolin Lubuk Selasih	1	0.0998	17491	2165	1070	4.406801	442			
		2	0.0999	17491	2248		4.271549	428			
		3	0.1002	17491	3004		3.293324	329			
		4	0.0997	17491	3168		3.127183	314			
		5	0.0998	17491	3269		3.031113	304			
		8	0.0998	17491	3464		2.857742	286			
		10	0.0997	17491	3568		2.771238	278			
		12	0.0999	17491	3664		2.694761	270			
3	Kaolin Ampang Kualo	1	0.0998	17491	1254	1500	5.351126	536			
		2	0.1	17491	1620		4.60609	461			
		3	0.0999	17491	2079		3.887119	389			
		4	0.1	17491	2335		3.560887	356			
		5	0.0998	17491	2496		3.377127	338			
		8	0.0998	17491	2647		3.217748	322			
		10	0.1002	17491	2763		3.102979	310			
		12	0.1	17491	2831		3.038559	304			
4	Bentonit Pasaman	1	0.1002	17491	444	1030	10.86635	1084			
		2	0.1002	17491	597		9.750461	973			
		3	0.1002	17491	721		8.989149	897			
		4	0.1002	17491	817		8.469951	845			
		5	0.0998	17491	829		8.408822	843			
		8	0.1001	17491	832		8.393663	839			
		9	0.1003	17491	848		8.313632	829			
		10	0.0998	17491	889		8.114643	813			
		11	0.0997	17491	927		7.93766	796			
		12	0.0998	17491	962		7.780622	780			
		5	Bentonit Pariaman	1	0.0998		17491	355	470	20.20121	2024
				2	0.1001		17491	461		17.78733	1777
3	0.1003			17491	547	16.19862	1615				

	4	0.0999	17491	597	15.39269	1541
	5	0.1001	17491	615	15.12074	1511
	8	0.1003	17491	622	15.0174	1497
	9	0.0997	17491	625	14.97352	1502
	10	0.0997	17491	633	14.85766	1490
	11	0.0998	17491	661	14.46508	1449
	12	0.1002	17491	674	14.28934	1426

*) CS = Count Sorpsi di hari terakhir

Misalnya, diketahui :

- Kaolin Membalong, hari ke – 5, massa 0.1000 g
- Co = 5658; Ct = 31; CS = 450

$$X = \frac{(Co - (CS + Ct))}{(CS + Ct)} = \frac{(5658 - (450 + 31))}{(450 + 31)} = 10.7630$$

$$Kd = 10.7630 \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1 \text{ g}} = 1076.2994 \frac{\text{mL}}{\text{g}} = 1076 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

Lampiran 3. Penentuan Pengaruh Konsentrasi NaCl

Data Perhitungan Hasil Cacah (Count) tiap – tiap sampel sebanyak volume 10 ml

No.	Jenis sampel	[NaCl] M	Massa (g)	Co	Count (Ct)	(Co-Ct)/Ct	Kd = (Co-Ct)/Ct*V/m
1	Kaolin Membalong	0					1147
		0.1	0.1001	5658	1023	4.5308	453
		0.5	0.0998	5658	1556	2.6362	264.153
		1.0	0.0999	5658	2948	0.9193	92
2	Kaolin Lubuk Selasih	0					1529
		0.1	0.0999	17491	3269	4.350566	435
		0.5	0.0999	17491	7764	1.252834	125
		1.0	0.0998	17491	10579	0.65337	65
3	Kaolin Ampang	0					1057
		0.1	0.0997	17491	4961	2.5257	253
		0.5	0.0999	17491	10171	0.7197	72.04137
		1.0	0.0999	17491	12041	0.4526	45
4	Bentonit Pasaman	0					1601
		0.1	0.1	17491	4871	2.5908	259
		0.5	0.1001	17491	12803	0.3662	36.57984
		1.0	0.1002	17491	14478	0.2081	21
5	Bentonit Pariaman	0					3658
		0.1	0.0999	17491	4971	2.5186	252
		0.5	0.0999	17491	13492	0.2964	29.66946
		1.0	0.1001	17491	14110	0.2396	24

Misalnya, diketahui :

- Kaolin Lubuk Selasih, massa 0.0999 g
- [NaCl] = 0.5 M, Co = 17491; Ct = 7764; V = 10 mL

$$Kd = \frac{(Co-Ct)}{Ct} \frac{V}{m} = \frac{(17491-7764)}{7764} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.0999 \text{ g}}$$

$$= \frac{9727}{7764} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.0997 \text{ g}} = 125.4088 \frac{\text{mL}}{\text{g}} = 125 \frac{\text{mL}}{\text{g}}$$

Lampiran 4. Penentuan Pengaruh Konsentrasi CsCl

Data Perhitungan Hasil Cacah (Count) tiap – tiap sampel sebanyak volume 10 ml

No.	Jenis sampel	[CsCl] M	Massa (g)	Co	Count (Ct)	(Co-Ct)/Ct	Kd=(Co-Ct)/Ct*V/m
1	Kaolin Membalong	10 ⁻⁸	0.0999	5658	454	11.46256	1147
		10 ⁻⁷	0.0999	5658	579	8.772021	878
		10 ⁻⁶	0.1	5658	967	4.851086	485
		10 ⁻⁵	0.1001	5658	1750	2.233143	223
		10 ⁻⁴	0.1001	5658	2668	1.12069	112
2	Kaolin Lubuk Selasih	10 ⁻⁸	0.0997	17491	2641	5.62287	564
		10 ⁻⁷	0.1001	17491	2867	5.100802	510
		10 ⁻⁶	0.1001	17491	4513	2.875692	287
		10 ⁻⁵	0.0998	17491	7967	1.195431	120
		10 ⁻⁴	0.0999	17491	13193	0.325779	33
3	Kaolin Ampang Kualo	10 ⁻⁸	0.1003	17491	1501	10.6529	1062
		10 ⁻⁷	0.1002	17491	1517	10.52999	1051
		10 ⁻⁶	0.1	17491	1787	8.787913	879
		10 ⁻⁵	0.0999	17491	2648	5.605363	561
		10 ⁻⁴	0.1002	17491	6178	1.831175	183
4	Bentonit Pasaman	10 ⁻⁸	0.1	17491	1047	15.70583	1571
		10 ⁻⁷	0.1	17491	1472	10.88247	1088
		10 ⁻⁶	0.1003	17491	1634	9.704406	968
		10 ⁻⁵	0.1002	17491	2669	5.553391	554
		10 ⁻⁴	0.0998	17491	3668	3.768539	378
5	Bentonit Pariaman	10 ⁻⁸	0.0999	17491	470	36.21489	3625
		10 ⁻⁷	0.0999	17491	882	18.83107	1885
		10 ⁻⁶	0.1003	17491	1129	14.49247	1445
		10 ⁻⁵	0.1	17491	1223	13.30172	1330
		10 ⁻⁴	0.0998	17491	1311	12.34172	1237

Misalnya, diketahui :

- Bentonit Pasaman, massa 0.1003 g
- [CsCl] = 10⁻⁶ M, Co = 17491; Ct = 1634; V = 10 mL

$$\begin{aligned}
 Kd &= \frac{(Co-Ct)}{Ct} \frac{V}{m} = \frac{(17491-1634)}{1634} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1003 \text{ g}} \\
 &= \frac{15857}{1634} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1003 \text{ g}} = 967.5380 \frac{\text{mL}}{\text{g}} = 968 \frac{\text{mL}}{\text{g}}
 \end{aligned}$$

Lampiran 5. Penentuan Pengaruh Karbonat dalam Larutan

Data Perhitungan Hasil Cacah (Count) tiap – tiap sampel sebanyak volume 10 ml

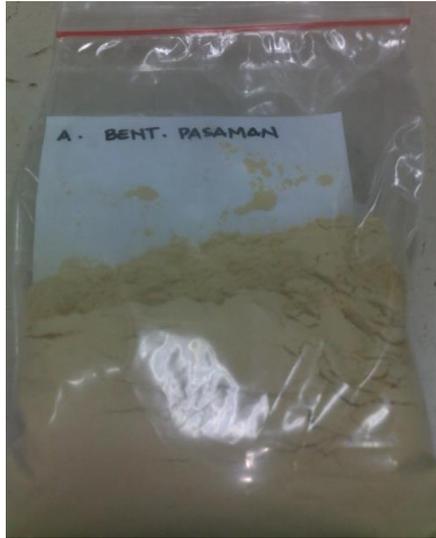
No.	Jenis sampel	[Na ₂ CO ₃] M	Massa (g)	Co	Count (Ct)	(Co-Ct)/Ct	Kd = (Co-Ct)/Ct*V/m
1	Kaolin Membalong	10 ⁻⁸	0.0999	5658	284	18.92254	1894
		10 ⁻⁶	0.1001	5658	441	11.82993	1182
		10 ⁻⁴	0.0999	5658	899	5.29366	530
2	Kaolin Lubuk Selasih	10 ⁻⁸	0.1002	17491	1521	10.49967	1048
		10 ⁻⁶	0.1	17491	1787	8.787913	879
		10 ⁻⁴	0.0998	17491	8362	1.091724	109
3	Kaolin Ampang	10 ⁻⁸	0.0999	17491	3083	4.67337	468
		10 ⁻⁶	0.1001	17491	3531	3.953554	395
		10 ⁻⁴	0.1	17491	6502	1.690095	169
4	Bentonit Pasaman	10 ⁻⁸	0.1	17491	917	18.07415	1807
		10 ⁻⁶	0.0998	17491	1183	13.78529	1381
		10 ⁻⁴	0.0997	17491	2671	5.548484	557
5	Bentonit Pariaman	10 ⁻⁸	0.1002	17491	682	24.64663	2460
		10 ⁻⁶	0.1001	17491	1509	10.59112	1058
		10 ⁻⁴	0.1	17491	2565	5.819103	582

Misalnya, diketahui :

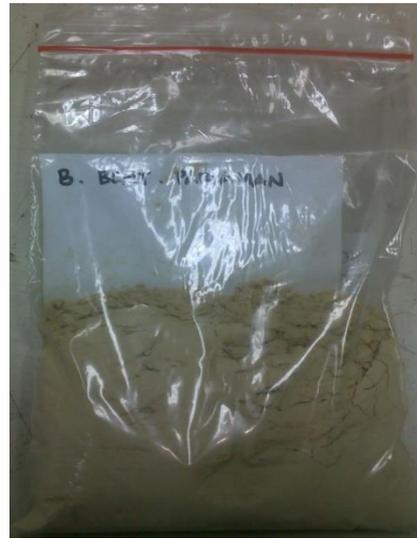
- Bentonit Pariaman, massa 0.1003 g
- [CsCl] = 10⁻⁸ M, Co = 17491; Ct = 682; V = 10 mL

$$\begin{aligned}
 Kd &= \frac{(Co-Ct)}{Ct} \frac{V}{m} = \frac{(17491-682)}{682} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1002 \text{ g}} \\
 &= \frac{16809}{682} \times \frac{10 \text{ mL}}{0.1002 \text{ g}} = 2459.7433 \frac{\text{mL}}{\text{g}} = 2460 \frac{\text{mL}}{\text{g}}
 \end{aligned}$$

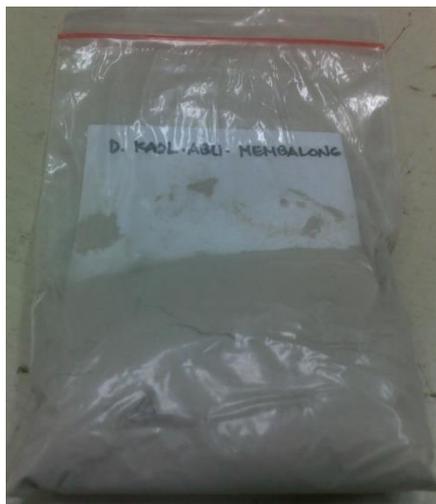
Lampiran 6. Gambar Sampel (Bentonit dan Kaolin) dalam 100 mesh



Bentonit Pasaman



Bentonit Pariaman



Kaolin Membalong



Kaolin Ampang Kualo



Kaolin Lubuk Selasih



Wadah Polietilen 20 mL

Lampiran 7. Gambar Alat



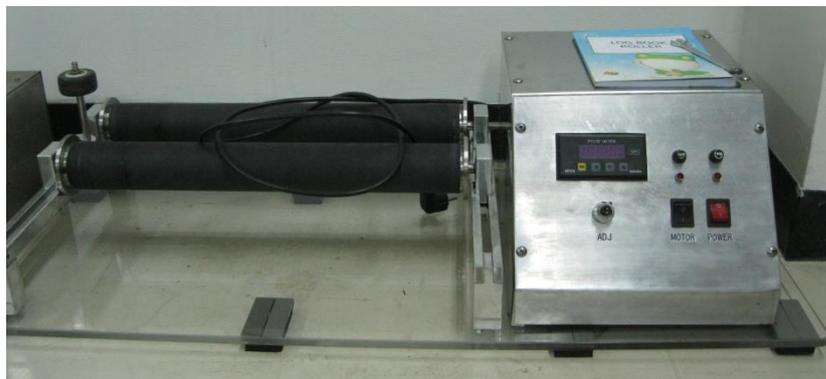
Centrifuge Labofuge 400



Neraca Analitik



Analisis Radiometrik MCA (Multi Channel Analyzer)



roller