

PERPINDAHAN COBALT-60, STRONTIUM-85 DAN CESIUM-137 DALAM CAMPURAN BENTONIT PASIR

Aisyah

Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PERPINDAHAN ^{60}Co , ^{85}Sr DAN ^{137}Cs DALAM CAMPURAN BENTONIT PASIR. Campuran bentonit pasir dipelajari untuk mengevaluasi kemampuannya sebagai "bahan urug". Pengukuran koefisien sebaran (Kd) dilakukan dengan metode catu. Diperoleh hasil bahwa untuk ^{60}Co Kd dalam pasir adalah 8 kali Kd dalam bentonit, Kd ^{85}Sr dalam bentonit adalah 40 kali Kd dalam pasir. Untuk ^{137}Cs Kd dalam bentonit dan dalam pasir hampir sama. Kd ^{60}Co dan ^{85}Sr dalam campuran bentonit pasir tergantung dari perbandingan campuran dan dapat dihitung dari harga Kd masing-masing komponen dalam campuran. Permeabilitas (k) dari campuran bentonit pasir diukur dengan metode Standar Industri Jepang. Permeabilitas campuran bentonit pasir semakin kecil dengan bertambahnya bentonit dalam campuran. Untuk campuran 10% bentonit permeabilitasnya kira-kira 1/500 dari permeabilitas pasir. Percobaan kolom dilakukan untuk mengetahui perpindahan ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs dalam lapisan campuran 3% bentonit. Tampang konsentrasi radionuklida dalam lepasan dan dalam lapisan yang mengandung ketiga radionuklida ke dalam kolom. Kecepatan perpindahan untuk ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs berturut-turut adalah $3,02 \times 10^{-2}$, $3,406 \times 10^{-3}$ dan $1,255 \times 10^{-3}$ cm/menit. ^{137}Cs berpindah paling lambat di antara ketiga radionuklida.

ABSTRACT

MIGRATION OF ^{60}Co , ^{85}Sr AND ^{137}Cs ON BENTONITE SAND MIXTURE. A bentonite sand mixture has been studied to evaluate its capability as backfill material. The distribution coefficient (Kd) was measured by a batch method. It was found that Kd of ^{60}Co on sand was 8 times higher than Kd on bentonite and Kd of ^{85}Sr on bentonite was 40 times higher than Kd on sand. For ^{137}Cs the Kd on bentonite is nearly the same as that found on sand. The Kd value on mixture of ^{60}Co and ^{85}Sr is depend on the mixing ratio and can be calculated from the Kd of each component. The permeability (k) of the mixture was measured using the Japanese Industrial Standard method. It was obtained that permeability of the mixture decreases with increasing amount of bentonite in the mixture. The permeability of a mixture containing 10% bentonite, was about 1/500 that of sand. Column experiment has been carried out on the migration of ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs through a 3% bentonite sand layer. Concentration profile of radio-nuclide in both effluent and bentonite sand layer were measured after pouring 5000 ml solution containing the radionuclide into the column. The migration velocities of ^{60}Co , ^{85}Sr and ^{137}Cs are 3.02×10^{-3} , 3.406×10^{-3} and 1.255×10^{-3} cm/minute. The migration of ^{137}Cs is the slowest among the three radionuclides.

PENDAHULUAN

Penyimpanan lestari limbah radioaktif aktivitas tinggi banyak dipelajari dan digunakan sistem bawah tanah (deep geological disposal system). Dalam sistem ini limbah radioaktif aktivitas tinggi tersebut diimobilisasi menjadi bentuk padatan yang stabil, yang kemudian dilindungi dengan sistem penahan ganda (multiple engineered barrier system) seperti *canisser*, *overpack* dan *backfill material* (bahan urug)⁽¹⁾. Sistem penahan ganda ini diharapkan mampu menahan terlepasnya radionuklida ke lingkungan.

Bentonit dengan kandungan utamanya *montmorillonit* merupakan salah satu bahan

urug yang terkenal karena mempunyai permeabilitas yang rendah dan relatif tinggi penyerapannya terhadap kation. Akan tetapi bentonit mempunyai sifat kekuatan mekanik dan hantaran panas yang rendah. Untuk memperbaiki sifat tersebut bentonit dapat dicampur dengan pasir.

Garry W.⁽³⁾ mengusulkan bahwa untuk memperoleh bahan yang cocok sebagai bahan urug, maka bahan urug itu terdiri dari 80%-90% pasir dan 10%-20% *montmorillonit*. Pasir dalam bahan urug ini berfungsi sebagai penghantar panas yang ditimbulkan oleh limbah, dan untuk menekan sifat pengembangan dari bentonit.

Sedangkan montmorillonit berfungsi sebagai penahan yang tak mudah diresapi air dan juga terhadap perpindahan radionuklida karena mempunyai sifat penyerapan yang besar. Untuk menentukan *Kd* dilakukan dengan metode catu. Percobaan kolom dilakukan untuk mengetahui perpindahan ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs pada campuran 3% bentonit.

BAHAN DAN TATA KERJA

Persiapan contoh

Bentonit yang digunakan dalam percobaan ini adalah bentonit yang diproduksi oleh Kanto Chemical Co. Inc. yaitu bentonit yang ada di pasaran Jepang dan mengandung 90% tipe Na montmorillonit dengan ukuran butir 100 mesh.

Pasir diambil dari ROKKASO-MURA, Shimokita Peninsula, Aomori Pref., Japan, dimana daerah ini merupakan calon lokasi pembuangan lestari limbah radioaktif. Sebelum digunakan, pasir dikeringkan pada suhu 100°C dan diayak dengan ukuran 100 mesh. Pasir ini mengandung 0,4% chlorite, 3,4% hallosite dan smectite. Komposisi kimia dari pasir ini bisa dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi kimia pasir

Komponen	% berat
SiO_2	73,88
Al_2O_3	12,37
TiO_2	0,30
Fe_2O_3	1,47
CaO	2,39
MgO	1,60
FeO	1,49
Na_2O	1,69
K_2O	0,42
P_2O_5	0,05
MnO	0,06
H_2O	4,07

Radionuklida yang digunakan dalam percobaan $^{60}\text{CoCl}_2$, $^{85}\text{SrCl}_2$ dan $^{137}\text{CsCl}$. Larutan radioaktif tersebut dibuat dengan melarutkan stok larutan pH 1 dengan air suling, dan pH diatur menjadi netral dengan penambahan larutan NaOH. Dengan demikian konsentrasi radionuklida dalam larutan menjadi 1,73 mikro Ci/ml ^{60}Co , 2,54 mikro Ci/ml ^{85}Sr dan 1,78 mikro Ci/ml ^{137}Cs . Susunan tiruan air tanah yang digunakan mendekati air tanah yang ada di ROKKASO-MURA yang dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi simulasi air tanah

Komponen	Konsentrasi (ppm)
Na^+	5,93
K^+	0,275
Ca^+	1,365
Mg^{2+}	1,09
SO_4^{2-}	10,15
HCO_3^-	2,85
Cl^-	6,276
pH	6,4

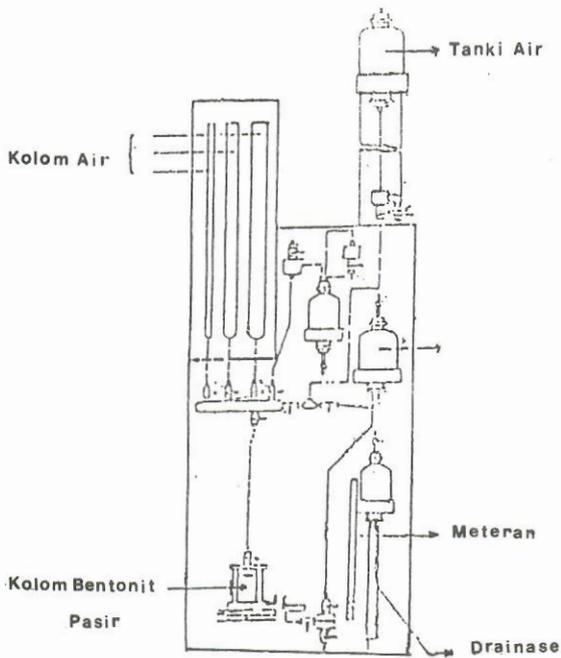
Tata kerja

Penentuan koefisien distribusi (*Kd*)

Campuran bentonit pasir (perbandingan campuran 0 ; 0,1 ; 0,3 ; 1,0 ; 3,0 ; 10,0 dan 100% bentonit) dengan berat 2,5 gram dicampur dengan tiruan air tanah sebanyak 250 ml dan larutan radionuklida 1 ml. Campuran ini dimasukkan ke dalam botol erlenmeyer dan dikocok dalam penangas air pada suhu 25°C . Larutan diambil secara periodik untuk diukur konsentrasinya sampai kesetimbangan dicapai. Setelah kesetimbangan dicapai larutan dan padatan (campuran bentonit pasir) dipisahkan untuk diukur konsentrasinya. Untuk mengukur konsentrasi radionuklida dalam larutan dilakukan pemisahan dengan pemutaran (3000 rpm x 20 menit) terlebih dulu untuk memisahkan cairan dan padatan yang terikat, kemudian larutan supernatan diambil 3 ml dan dijadikan 50 ml dengan penambahan air suling. Konsentrasi larutan diukur dengan MCA. Campuran bentonit pasir yang telah terpisah dikeringkan pada suhu 100°C selama 1 hari, dan diambil 1 gram dicampur dengan HCl 0,1N sebanyak 40 ml untuk diukur konsentrasinya dengan MCA.

Penentuan kelucutan (*k*)

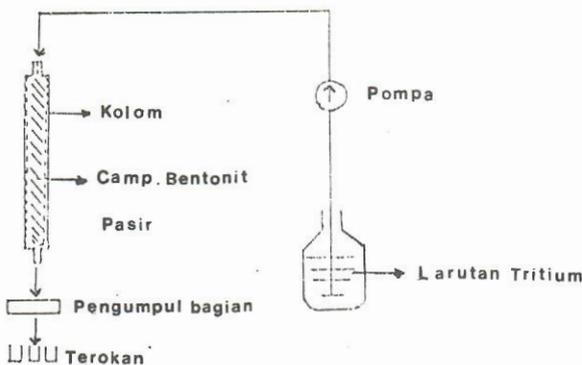
Penentuan kelucutan campuran bentonit pasir dilakukan dengan metode Standar Industri Jepang seperti ditunjukkan dalam Gambar 1. Rangkaian peralatan terdiri dari kolom untuk campuran bentonit pasir, kolom air, tangki air dan sebagainya. Kolom bentonit pasir terbuat dari polyvinyl chlorida dengan ukuran tinggi 20 cm dan diameter dalam 2,5 cm serta di bagian atas dan bawah kolom diberi wol gelas. Kolom campuran bentonit pasir dijenuhkan terlebih dulu dengan air suling, kemudian volum air suling yang melewati kolom bentonit pasir diukur.



Gambar 1. Peralatan percobaan kelucutan

Penentuan kecepatan perpindahan

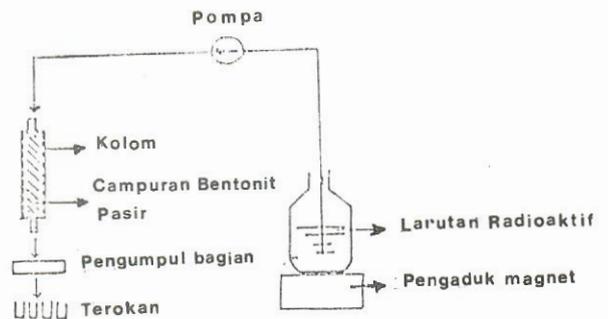
Tritium digunakan untuk mendapatkan koefisien pencar dan kecepatan alir dalam lapisan campuran bentonit pasir. Alat percobaan secara bagan ditunjukkan dalam Gambar 2, terdiri dari kolom bentonit pasir, pompa tabung renik, pengumpul fraksi. Kolom terbuat dari polyvinyl chlorida dengan ukuran tinggi 20 cm dan diameter 2,5 cm yang dilengkapi dengan benang gelas di bagian atas dan bawah kolom. Campuran bentonit pasir yang digunakan adalah campuran 3% bentonit.



Gambar 2. Peralatan untuk penentuan koefisien pencar

Kolom dijenuhkan dengan air suling terlebih dulu dan laju alir dibuat tetap. Setelah itu tritium dengan konsentrasi $1,032 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/ml}$ dialirkan dengan laju alir tetap 1,6 ml/menit. Lepasannya ditampung dalam pengumpul bagian, dan dipusingkan (3000 rpm 20 menit) sebelum diukur konsentrasinya. Tiap 2 ml larutan supernatan dicampur dengan air suling 2 ml dan larutan sintilasi (AQUASOL-2) 12 ml, dan konsentrasi tritium diukur dengan alat cacah sintilasi.

Percobaan perpindahan dilakukan dengan menggunakan peralatan yang secara bagan ditunjukkan dalam Gambar 3, yang terdiri dari kolom bentonit pasir dengan tinggi 10 cm dan diameter 2,5 cm, pompa tabung renik, dan pengumpul bagian. Setelah laju alir dalam kolom dibuat tetap dengan jalan mengalirkan tiruan air tanah ke kolom, larutan radioaktif dengan konsentrasi ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs masing-masing $1,301 \times 10^{-2}$, $2,624 \times 10^{-2}$ dan $1,05 \times 10^{-2} \mu\text{Ci/ml}$ sebanyak 5000 ml dialirkan ke kolom dengan pompa tabung renik dengan laju alir tetap 1,6 ml/menit. Larutan lepasannya ditampung tiap 250 ml dalam pengumpul bagian. Setelah percobaan selesai campuran bentonit pasir dalam kolom dipotong tiap 1 cm dan dikeringkan pada suhu 100°C selama 1 hari. Untuk mengukur konsentrasi campuran bentonit pasir, tiap 1 gram campuran yang telah kering dicampur dengan larutan HCl 0,1 N sebanyak 45 ml. Konsentrasi tiap radionuklida dalam terakan lepasan dan dalam terakan campuran bentonit pasir diukur dengan MCA.



Gambar 3. Peralatan percobaan migrasi

METODE PERHITUNGAN

Perhitungan Kd

K_d untuk ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs dalam tiap perbandingan campuran bentonit pasir dihitung dengan persamaan:

Kd (ml/g)

$$= \frac{\text{konsentrasi radionuklida dalam padatan}}{\text{konsentrasi radionuklida dalam cairan}} \quad (1)$$

Kd ^{60}Co , ^{85}Sr dan ^{137}Cs dalam campuran bentonit pasir dapat juga dihitung dengan persamaan (4):

$$Kd_m = (Kd_b \times W) + (Kd_s \times (1 - W)) \quad (2)$$

Kd_m = koefisien tebaran dalam campuran, Kd_b = koefisien tebaran dalam bentonit, Kd_s = koefisien tebaran dalam pasir, W = bagian berat bentonit

Perhitungan kelucutan (k)

Kelucutan setiap campuran bentonit pasir dihitung dengan persamaan :

$$k = 2.3 \frac{\alpha L}{A (t_2 - t_1)} \log \frac{h_1}{h_2} \quad (3)$$

k = kelucutan (cm/det), A = luas penampang kolom bentonit pasir (cm²), α = luas penampang kolom air (cm²), h = tinggi air dalam kolom air (cm), L = panjang kolom bentonit pasir (cm), t = waktu (detik)

Perhitungan kecepatan perpindahan

Kecepatan alir dan koefisien pencar ditentukan dengan persamaan :

$$\frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v \frac{\delta C}{\delta x} \quad (4)$$

C = konsentrasi ^3H dalam efluen, x = koordinat, t = waktu, D = koefisien pencar, v = kecepatan alir.

Rd dan kecepatan perpindahan tiap radionuklida dalam campuran bentonit pasir dihitung dengan persamaan:

$$Rd \frac{\delta C}{\delta t} = D \frac{\delta^2 C}{\delta x^2} - v \frac{\delta C}{\delta x} \quad (5)$$

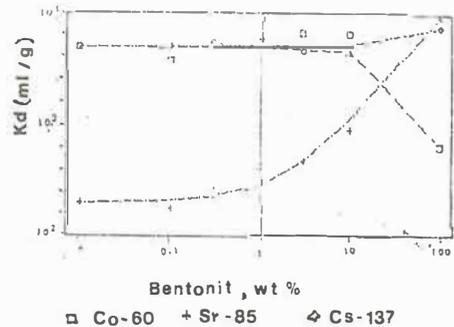
Rd adalah faktor perlambatan dan mempunyai hubungan dengan Kd ($Rd = 1 + (1-f) \rho Kd/fs$, dan s : derajat kejenuhan).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Koefisien distribusi (Kd)

Kd tiap radionuklida dihitung dengan persamaan 1 dan ditunjukkan dalam Gambar 4. Kd untuk ^{85}Sr semakin besar dengan naiknya perbandingan bentonit dalam campuran, untuk ^{137}Cs Kd tetap sekitar 5000 ml/g, sedangkan untuk ^{60}Co Kd nya juga tetap sekitar 6000 ml/g, kecuali untuk campuran 100% bentonit. Untuk

^{137}Cs , hal ini bisa diterangkan karena adanya ^{137}Cs yang berupa partikel yang terserap dalam butiran bentonit yang sangat halus dan sukar terpisah dengan larutannya pada saat pemusungan, sehingga menurunkan harga Kd dalam bentonit sampai harga Kd yang hampir sama dalam pasir. Oleh sebab itu Kd tidak tergantung pada perbandingan bentonit dalam campuran. Kd ^{60}Co dalam pasir adalah 8 kali dari Kd dalam bentonit. Hal ini karena terbentuknya $^{60}\text{Co}(\text{OH})_2$ dalam suasana alkali (100% bentonit) yang tidak terserap oleh bentonit dan lolos, terikut lepasan, sehingga menyebabkan Kd dalam bentonit lebih kecil. Untuk Kd ^{85}Sr dalam bentonit adalah 40 kali lebih besar dari pada dalam pasir. Oleh karena itu Kd dari ^{85}Sr dan ^{60}Co dalam campuran bentonit pasir tergantung dari perbandingan campuran.



Keterangan:
□, +, ◇ = hasil didasarkan atas percobaan
----- = hasil didasarkan atas perhitungan

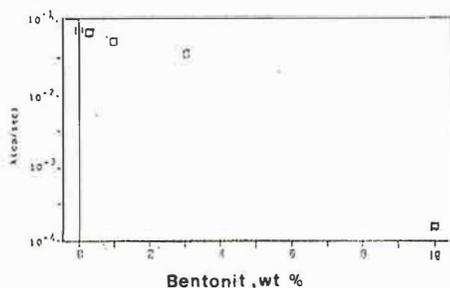
Gambar 4. Koefisien distribusi Co-60, Sr-85 dan Cs-137

Perhitungan Kd dalam campuran bentonit pasir untuk tiap radionuklida yang dihitung menurut persamaan 2 ditunjukkan dalam Gambar 4. Perhitungan Kd ini sesuai dengan Kd hasil pengamatan. Oleh karena itu diperoleh bahwa Kd dalam campuran bentonit pasir dapat dihitung dari harga Kd masing-masing komponen dalam campuran persamaan 2.

Kelucutan

Sesuai dengan kegunaan bahan urug, bahan kelucutan yang rendah merupakan salah satu persyaratan yang diperlukan guna dapat menahan perpindahan air tanah ke dalam limbah di samping tinggi kemampuan penyerapan kationnya.

Kelucutan campuran bentonit pasir ditunjukkan dalam Gambar 5. Massa jenis dan porositas tiap-tiap campuran adalah 1,4-1,5 g/cm³

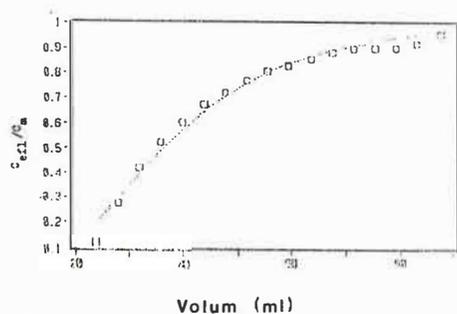


Gambar 5. Kelucutan

dan 0,43 - 0,45. Dari gambar 5 diperoleh bahwa kelucutan dari campuran akan bertambah baik dengan penambahan bentonit dan kelucutan 10% campuran bentonit adalah 1/500 kelucutan pasir. Oleh karena itu sangat mudah untuk menurunkan harga kelucutan campuran bentonit pasir yaitu dengan penambahan bentonit.

Kecepatan perpindahan

Dari persamaan 4 diperoleh harga kecepatan alir 1,02 cm/menit dan koefisien dispersi

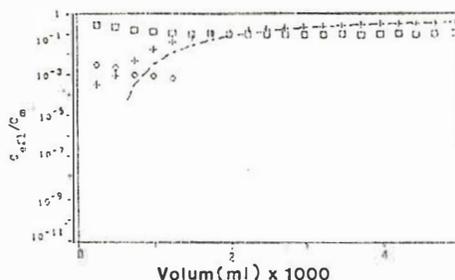


Keterangan:
□, +, ◇ = hasil didasarkan atas percobaan
----- = hasil didasarkan atas perhitungan

Gambar 6. Konsentrasi H-3 dalam lepasan

3,06 cm²/menit. Tampang konsentrasi ³H dalam lepasan ditunjukkan dalam Gambar 6.

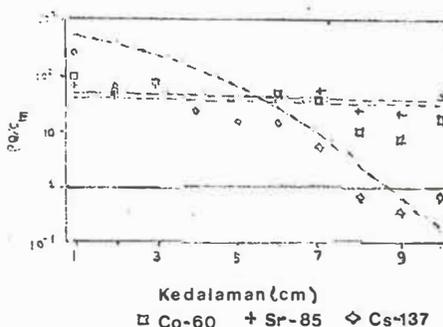
Konsentrasi ⁶⁰Co, ⁸⁵Sr dan ¹³⁷Cs dalam lepasan melalui lapisan 3% bentonit yang dinormalkan dengan konsentrasi tiap radionuklida mula-mula ditunjukkan dalam Gambar 7. Konsentrasi ⁶⁰Co dalam lepasan agak menurun dengan bertambahnya volum sedangkan untuk ⁸⁵Sr konsentrasinya semakin besar sampai dicapai kesetimbangan. Konsentrasi ¹³⁷Cs dalam lepasan mendekati batas deteksi dan sebagian besar tertahan dalam lapisan bentonit pasir.



Keterangan:
□ Co-60 + Sr-85 ◇ Cs-137
□, +, ◇ = hasil didasarkan atas percobaan
----- = hasil didasarkan atas perhitungan

Gambar 7. Tampang konsentrasi Co-60, Sr-85 dan Cs-137 dalam lepasan.

Konsentrasi tiap radionuklida dalam lapisan bentonit pasir juga dinormalkan dengan konsentrasi mula-mula ($\rho Q/C_m$, ρ : bulk density, C_m : konsentrasi mula-mula) ditunjukkan dalam Gambar 8. Tampang konsentrasi ⁶⁰Co dan ⁸⁵Sr dalam lapisan campuran bentonit pasir hampir sama satu sama lain dan konsentrasinya tetap untuk setiap kedalaman. Konsentrasi ¹³⁷Cs semakin kecil dengan kedalaman kolom dan perpindahannya paling lambat di antara ketiga radionuklida.



Keterangan:
□, +, ◇ = hasil didasarkan atas percobaan
----- = hasil didasarkan atas perhitungan

Gambar 8. Tampang konsentrasi Co-60, Sr-85 dan Cs-137 dalam campuran bentonit pasir

Dari persamaan 5 dapat diperoleh harga Rd dan dapat diketahui perpindahan tiap radionuklida dalam lapisan campuran bentonit pasir. Harga Rd untuk ⁶⁰Co, ⁸⁵Sr dan ¹³⁷Cs masing-masing 243, 215 dan 584, sedang kecepatan perpindahannya berturut-turut 3,02x10⁻³, 3,406x10⁻³ dan 1,255x10⁻³ cm/menit.

KESIMPULAN

Dari hasil percobaan diperoleh:

Kd ^{60}Co dalam bentonit lebih rendah dari pada dalam pasir, Kd ^{85}Sr dalam bentonit lebih rendah dari pada dalam pasir. Untuk ^{137}Cs Kd dalam bentonit hampir sama dengan dalam pasir. Kd dalam campuran bentonit pasir untuk ^{60}Co dan ^{85}Sr tergantung pada perbandingan campuran dan dapat dihitung dari Kd masing-masing komponen dalam campuran dengan persamaan 2.

Kelucutan campuran bisa diperbaiki dengan penambahan bentonit dalam campuran dan untuk campuran 10% bentonit mempunyai harga kelucutan sekitar 1/500 kelucutan pasir.

Dalam campuran 3% bentonit pasir ^{137}Cs bermigrasi paling lambat di antara ^{60}Co dan ^{85}Sr dan kecepatan perpindahannya menurut : $V^{85}\text{Sr} > V^{60}\text{Co} > V^{137}\text{Cs}$.

DAFTAR PUSTAKA

1. Konishi, M. Yamamoto, K. and Yanagi, T., Sorption behavior of cesium and strontium ion on natural mineral, Technology reports of The Osaka University, 36 (1986) 397-403.
2. Konishi, M., Physical and chemical properties of bentonite - Loam mixture as backfill material, Proc. of the joint int. waste management conf., I (1989) 475-480.
3. Gary Beall, W. and Bertallard., Chemical aspects governing the choice of backfill materials for nuclear waste repositories, Nuclear Technology, 59 (1982) 405-408.
4. Yanagi, T., Watanabe, M., Yamamoto, K. Sorption behavior of cesium and strontium ions on mixtures of clay sorbents, Journal of Nuclear Science and Technology, 26(9) (1989) 861-864..

dan N = jumlah atom dalam cuplikan tersebut.
Bila berat cuplikan = G gram, maka:

$$N = \frac{G \times 6,022 \times 10^{23}}{235} \text{ Atom} \quad (3)$$

E bergantung pada:

1. bentuk (geometri) cuplikan
2. jarak cuplikan ke detektor
3. energi gamma yang diamati

Karena elemen bakar Triga sama bentuknya, jarak ke detektor dibuat sama, energi gamma yang diselidiki sama (186 keV) maka E adalah sama untuk setiap elemen bakar, maka

$$N_1 \lambda E = C_1 - B$$

$$N_2 \lambda E = C_2 - B$$

sehingga:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{C_1 - B}{C_2 - B} \quad (4)$$

B adalah sama untuk suatu seri percobaan pada suatu hari tertentu.

Selanjutnya jumlah cacahan yang sudah dikoreksi pada 186 keV untuk 2 elemen bakar adalah:

$$C_1 - B = C_{1k} \quad (5)$$

$$C_2 - B = C_{2k} \quad (6)$$

Maka dari (4) diperoleh:

$$\frac{G_1}{G_2} = \frac{C_{1k}}{C_{2k}} = K \text{ (konstan)} \quad (7)$$

Bila suatu elemen bakar misalnya yang ke- i , yang sudah dikoreksi terhadap cacahan latar belakangnya menjadi C_{ik} , maka kandungan U-235 dalam gram adalah:

$$G_1 = C_{1k} \times K \quad (8)$$

TATAKERJA

Mula-mula dilakukan kalibrasi pada saluran MCA/PCA dengan Co-60, Cs-137 dan Am-241. Selanjutnya elemen bakar nomor 1 dicacah pada energi 186 keV dengan 5 saluran ke kiri dan 5 saluran ke kanan, begitu juga untuk elemen bakar nomor 2.

Untuk koreksi hasil cacahan elemen bakar, ditentukan cacahan latar belakang (B). Selama eksperimen harga B dianggap tetap. Selanjutnya dicacah elemen bakar nomor 3. Hasil cacahan dikurangi dengan B , maka diperoleh hasil cacahan bersih (C_{3k}). Pencacahan elemen bakar dilakukan terus sampai dengan i buah.

Pencacahan tersebut telah dilakukan terhadap 16 buah elemen bakar dengan waktu cacah 120 detik dan 8 buah elemen bakar dengan waktu cacah 200 detik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pencacahan elemen bakar pada waktu cacah 120 dan 200 detik dapat dilihat pada Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Kelompok dengan waktu cacah 120 detik

No. urut	No. el. bak. / tipe	Cacahan integral C_i	C_i per detik
01	9653/106	35334	294,45
02	9701/104	27923	232,69
03	9700/104	27819	231,83
04	9659/106	35285	294,04
05	9695/104	28338	236,15
06	9857/104	27278	227,32
07	9652/106	35180	293,17
08	9687/104	27859	232,16
09	9702/104	27565	229,71
10	9644/106	35243	293,69
11	9648/106	35250	293,75
12	9692/104	27866	232,22
13	9642/106	34942	291,18
14	9689/104	27861	232,18
15	9699/104	27740	231,17
16	9647/106	35201	293,34

Tabel 2. Kelompok dengan waktu cacah 200 detik

No. urut	No. el. bak. / tipe	Cacahan integral C_i	C_i per detik
1	9694/104	35564	177,82
2	9654/106	48347	241,74
3	9691/104	35257	176,29
4	9655/106	47621	238,11
5	9693/104	35682	178,41
6	9649/106	47987	239,94
7	9646/106	48572	242,86
8	9645/106	48757	243,79

Selanjutnya harga B , C_{ik} dan K dapat dihitung masing-masing dengan persamaan (4),(5) dan (8).

Untuk kelompok dengan waktu cacah 120 detik harga B dihitung sebagai berikut:

$$\frac{C_1 - B}{G_1} = \frac{C_2 - B}{G_2} \quad (4)$$

dimana $C_1 = 294,45$, $G_1 = 55,30$ gr, $C_2 = 232,69$, $G_2 = 37,96$ gr.

Setelah harga-harga tersebut dimasukkan ke dalam persamaan, maka diperoleh harga $B = 97,49$ cacahan/detik

Selanjutnya dengan persamaan (8) diperoleh:

$$K = \frac{G_1}{C_{1k}} = \frac{55,30}{294,5 - 97,49}$$

$$= 0,281 \text{ gramdet/cacahan}$$

Untuk kelompok dengan waktu cacah 200 detik, dimana harga $C_1 = 177,82$, $G_1 = 37,66$, $C_2 = 241,74$ dan $G_2 = 55,32$.

Dengan cara yang sama seperti pada perhitungan sebelumnya, diperoleh harga:

$B = 41,51$ cacahan/detik, $C_{ik} = 177,82 -$

$41,51 = 136,31$, $K = \frac{G_1}{C_{1k}} = \frac{37,66}{136,31} = 0,276$ gram

det./ cacahan.

Tabel 3. Perbandingan antara kelompok dengan waktu cacah 120 detik dengan data dari GA

No urut	No.el. bak	Ci - B	Perhi- tungan (gram)	G.A (gram)	Selisih (%)
1	9653	196,96	55,34	53,30	R
2	9701	135,20	37,99	37,96	R
3	9700	134,34	37,75	37,96	- 0,55
4	9659	196,55	55,23	55,41	- 0,32
5	9695	138,66	38,96	37,83	+ 2,72
6	9857	129,83	36,48	37,53	- 2,79
7	9652	195,68	54,98	54,70	+ 0,51
8	9687	134,67	37,84	38,16	- 0,84
9	9702	132,22	37,15	37,69	- 1,43
10	9644	196,20	55,13	54,88	+ 0,46
11	9648	196,26	55,14	54,74	+ 0,73
12	9692	134,73	37,86	37,82	+ 0,10
13	9642	193,69	54,42	54,52	- 0,18
14	9689	134,69	37,85	37,75	+ 0,29
15	9699	133,68	37,56	37,88	- 0,82
16	9647	195,85	55,03	54,96	+ 0,15

Keterangan :

$B = 97,49$ cacahan / detik ; $K = 0,281$ gram det/cacahan; R = *reference*

Setelah harga-carga B dan K diperoleh, maka dilakukan perhitungan untuk tiap elemen bakar dari 2 kelompok tersebut dan hasilnya dibandingkan dengan data yang diberikan oleh General Atomic.

Perbandingan harga-harga perhitungan dan data dari General Atomic dapat dilihat pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 4. Perbandingan antara kelompok dengan waktu cacah 200 detik dan data dari GA

No urut	No.el. bak	Ci - B	Perhi- tungan (gram)	G.A (gram)	Selisih (%)
1	9694	136,31	37,62	37,66	R
2	9654	200,22	55,26	55,32	R
3	9691	134,78	37,20	37,87	- 1,77
4	9655	196,60	54,26	54,42	- 0,29
5	9693	136,60	37,78	37,63	- 0,13
6	9649	198,43	54,77	54,87	- 0,18
7	9646	201,35	55,57	55,48	+ 0,16
8	9645	202,28	55,82	55,43	+0,72

Keterangan : B = 41,51 cacahan/detik; K = 0,276 gram det/cacahan; R = *reference*

Dari Tabel 3 dan 4 dapat dilihat bahwa secara umum selisih hasil perhitungan kadar U-235 dengan kadar U-235 yang diberikan oleh GA lebih kecil dari 5%. Selain itu, karena tidak ada elemen bakar tipe TRIGA yang mempunyai kadar U-235 yang baku, maka elemen bakar nomor urut 1 dan 2 telah dipakai sebagai patokan.

Perbedaan hanya latar belakang yang cukup besar yang merupakan hasil keluaran dari MCA/PCA, yang seharusnya sama, menyatakan bahwa perlu dilakukan koreksi terhadap perhitungan latar belakang.

KESIMPULAN

1. Metode ini bisa digunakan untuk mengukur kadar U-235 yang dipesan dengan kesalahan kurang lebih 5 %.
2. Latar belakang perlu dikoreksi
3. Bila selisih antara hasil perhitungan dengan data yang diberikan oleh produsen elemen bakar cukup besar (10%) maka elemen bakar tersebut dimasukkan ke dalam reaktor untuk diukur daya yang dibangkitkan oleh elemen bakar tersebut, karena daya elemen bakar sebanding dengan kadar U-235.
4. Walaupun sampai sekarang kita percaya pada data yang diberikan oleh produsen elemen bakar TRIGA, namun untuk reaktor

daya nanti, pengukuran kadar U-235 perlu dilakukan karena harga elemen bakar itu mahal.

DAFTAR PUSTAKA

1. Samuel Glasstone, Alexander Sesonske, Nuclear Reactor Engineering, 3th. ed. van Norstrand-Reinhold Company (1981).
2. William, J.Price, Nuclear Radiation Detection, McGraw Hill Book Company, New York, USA (1979).
3. Morgan, K.Z., Turner,Y.E., Princlpe of Radiation Protection , Robert E.Krieger Publishing Co,Hustington, New York, USA (1979).
4. Annonim, Handbook oh Radioactivity Measurements Procedures, 2nd. ed. NCRP Report No. 58A (1985).
5. Annonim, Radionucleides, Oris, CEA (1983).
6. Annonim, Course Manual, State system of accounting for and control of nuclear materials, 14-25 November 1988, Tashkent, USSR (1988).
7. Annonim, Course manual, International training course on implementation of state system of accounting for and control of nuclear materials, May 1-19,1989; Los Alomos National-Laboratory, Santa Fe, New Mexico and Richland, Washington, USA (1989).