

BENTONITE-QUARTZ SAND AS THE BACKFILL MATERIALS ON THE RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY

Bentonit-Pasir Kuarsa sebagai Kandidat Bahan Urug pada Penyimpanan Limbah Radioaktif

Raharjo* and Herry Poernomo

Research and Development Center for Advanced Technology, National Nuclear Energy Agency
Babarsari Street P.O. Box 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

Received 7 April 2005; Accepted 2 May 2005

ABSTRACT

An investigation of the contribution of quartz sand in the bentonite mixture as the backfill materials on the shallow land burial of radioactive waste has been done. The experiment objective is to determine the effect of quartz sand in a bentonite mixture with bentonite particle sizes of -20+40, -40+60, and -60+80 mesh on the retardation factor and the uranium dispersion in the simulation of uranium migration in the backfill materials. The experiment was carried out by the fixed bed method in the column filled by the bentonite mixture with a bentonite-to-quartz sand weight percent ratio of 0/100, 25/75, 50/50, 75/25, and 100/0 on the water saturated condition flown by uranyl nitrate solution at concentration (C_o) of 500 ppm. The concentration of uranium in the effluents in interval 15 minutes represented as C_t was analyzed by spectrophotometer, then using C_o and C_t , retardation factor (R) and dispersivity (α) were determined. The experiment data showed that the bentonite of -60+80 mesh and the quartz sand of -20+40 mesh on bentonite-to-quartz sand with weight percent ratio of 50/50 gave the highest retardation factor and dispersivity of 18.37 and 0.0363 cm, respectively.

Keywords: bentonite, quartz sand, backfill materials, radioactive waste

PENDAHULUAN

Untuk memenuhi ketentuan keselamatan lingkungan pada penyimpanan limbah radioaktif, maka dipersyaratkan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) bahwa penyimpanan lestari limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang dilakukan dengan sistem *shallow land burial* dalam bangunan repository yang baik pada lokasi yang terpilih. Repository yang baik harus mempunyai sistem penghalang ganda (*multibarrier system*) yang terdiri dari penghalang rekayasa (*engineered barrier*) dan penghalang alami (*natural barrier*).

Menurut Lopez [1], sebagai *backfill materials* biasanya digunakan bahan mineral alam lokal dengan beberapa persyaratan sebagai berikut : porositas rendah untuk memperkecil aliran air tanah dan difusi ion, sifat sorpsi baik untuk menghambat gerakan radionuklida apabila wadah rusak, konduktivitas panas cukup tinggi untuk dapat mengalirkan pelepasan panas yang memadai ke batuan di sekelilingnya, kapasitas beban menahan cukup untuk menyangga wadah, tetapi cukup plastis menghamburkan tekanan tinggi yang hanya terjadi di satu tempat, dalam jangka waktu yang lama stabil terhadap pengaruh kimia-fisis seperti suhu, tekanan dan kondisi air

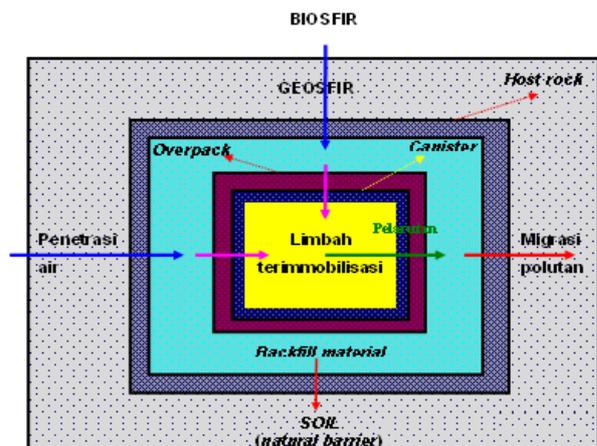
tanah, sifat-sifat kimia antara wadah, limbah radioaktif, air tanah dan batuan di sekitarnya harus sepadan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi migrasi radionuklida dari ruang penyimpanan limbah radioaktif ke tanah di sekelilingnya, yaitu kecepatan kerusakan wadah, pengaruh media berpori, proses terlepasnya radionuklida, difusi molekuler, sorpsi dan pengendapan, peluruhan radionuklida, kondisi batas antara ruang penyimpanan limbah radioaktif dengan lapisan tanah [2].

Susunan penghalang rekayasa yang dimulai dari bagian dalam ke luar adalah sebagai berikut : pertama adalah limbah radioaktif terimmobilisasi, kedua adalah wadah (*canister*), ketiga adalah *overpack*, keempat adalah *backfill material*, kelima adalah dinding repository dari bahan beton bertulang. Mekanisme migrasi radionuklida dari limbah radioaktif terimmobilisasi yang ada di dalam repository keluar ke lingkungan menurut Aoki [3] dan Lopez [1] dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1. Untuk meminimalkan dispersi radionuklida ke lingkungan, maka *backfill material* sebagai bagian dari penghalang rekayasa harus mempunyai persyaratan teknis antara lain : permeabilitas dan dispersi kecil, serta faktor retardasi besar [1].

* Corresponding author.

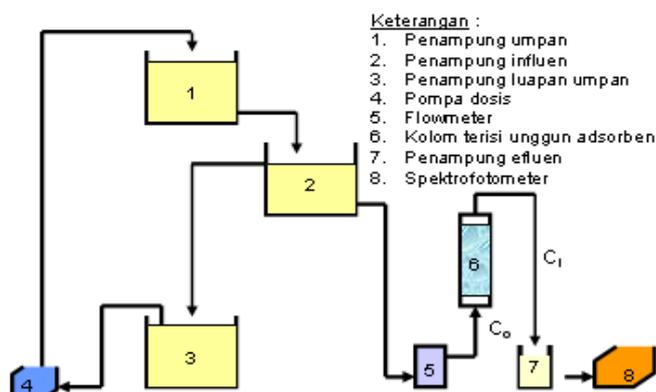
Email address : trondolo@yahoo.com



Gambar 1 Ilustrasi migrasi radionuklida pada multibarrier system

Bentonit adalah bahan mineral alam yang mempunyai kapasitas pertukaran kation dan plastisitasnya cukup tinggi, tahan pada suhu sampai dengan 200 °C, permeabilitas rendah dan mudah tersuspensi dalam air. Permeabilitas bentonit yang rendah dimaksudkan untuk menghambat intrusi air tanah ke wadah limbah, dengan demikian akan menunda korosi wadah limbah. Berdasarkan pertimbangan tersebut, maka sejumlah penelitian khususnya yang berkaitan dengan migrasi radionuklida dalam bahan urug (*backfill material*) dan bahan penyangga (*buffer material*) bentonit telah dilakukan oleh beberapa peneliti di Kanada dan Jepang. Beberapa peneliti seperti [1, 2, 4, 5] telah melakukan penelitian penghalang rekayasa (*engineered barrier*) dengan menggunakan bahan mineral lokal bentonit, lempung dan kuarsa sebagai bahan urug dan bahan penyangga sebagai bagian dari sistem penghalang rekayasa pada penyimpanan limbah radioaktif.

Menurut Lopez [1], penggunaan pasir kuarsa terhadap *backfill material* dari campuran bentonit dan pasir kuarsa untuk penyimpanan limbah radioaktif di Swedia adalah dengan 50% berat pasir kuarsa. Beberapa komposisi *backfill material* yang telah dipelajari peneliti lain, antara lain terdiri dari 52% berat pasir kuarsa, 25% montmorilonit, 14% vermiculit, 4% magnetit, 2% apatit, 2% atapulgit [6]. Kontribusi pasir kuarsa pada *backfill material* diharapkan dapat memperbaiki sifat fisik *backfill material* antara lain sebagai berikut : mengurangi *swelling pressure*, kandungan SiO₂ yang tinggi diharapkan dapat meningkatkan konduktor panas radiasi yang keluar dari paket limbah radioaktif, bulk density pasir kuarsa yang lebih tinggi daripada bentonit atau zeolit dapat meningkatkan kekuatan mekanik *backfill material* untuk menahan beban di atasnya, meningkatkan kemampuan mendistri-busikan konsentrasi tekanan di satu titik ke batuan di sekelilingnya secara merata apabila timbul gempa. [1, 7].



Gambar 2 Rangkaian peralatan simulasi migrasi uranium dalam campuran bentonit-pasir kuarsa

Ukuran partikel mineral berpengaruh terhadap karakteristik fisis seperti porositas (ϵ), *bulk density* (ρ_b), dan permeabilitas (K). Karakteristik fisis mineral, peristiwa kimia fisis seperti adsorpsi dan pertukaran ion dalam bahan urug, mempengaruhi kemampuan penghambat migrasi radionuklida. Kemampuan media padat berpori untuk menghambat migrasi radionuklida biasanya dinyatakan dengan faktor retardasi (R). Penyebaran atau dispersi radionuklida yang terlarut dalam solven yang mengalir dalam media padat berpori dinyatakan dengan dispersivitas. Faktor retardasi dan dispersivitas mempunyai peranan penting dalam pengkajian unjuk kerja penghalang rekayasa (*engineered barrier*) sistem penyimpanan limbah radioaktif [2].

Dalam artikel ini dilaporkan faktor retardasi dan dispersivitas uranium dalam campuran bentonit dan pasir kuarsa sebagai kandidat *backfill material* pada penyimpanan limbah radioaktif.

METODE PENELITIAN

Bahan

Bentonit dari daerah Nanggulan kabupaten Kulonprogo, propinsi DIY, larutan uranil nitrat 500 ppm, pasir kuarsa, akuades dan arsenazo III.

Peralatan

Penggerus, pengayak, oven, neraca analitis, rangkaian peralatan gelas untuk percobaan simulasi migrasi uranium dalam bahan urug seperti Gambar 2, spektrofotometer untuk analisis uranium.

Prosedur

Penggerusan dan Pengayakan Bentonit

Bongkahan kecil bentonit maupun pasir kuarsa dikeringkan dalam oven sampai berat yang tetap, kemudian digerus sampai menjadi serbuk. Serbuk bentonit maupun pasir kuarsa dimasukkan dalam panci ayakan standar ASTM ISO 565-R20 yang disusun dari atas ke bawah yaitu 20, 40, 60, 80

mesh. Mesin pengayak dihidupkan selama 30 menit. Hasil pengayakan diambil dari masing-masing panci ayakan. Bentonit diambil masing-masing ukuran -20+40, -40+60 dan -60+80 mesh sedangkan untuk pasir kuarsa -20+40 mesh.

Penentuan Rapat Massa Curah Bentonit

Akuades dialirkan dari buret ke dalam wadah silindris sampai tepat bagian atas wadah. Pengurangan akuades dalam buret dicatat (V_u), yang merupakan volume unggun. Serbuk bentonit dimasukkan secara curah ke dalam wadah yang telah diketahui volume wadah (V_u) dan berat wadah (M_k) sampai melebihi volume wadah. Kelebihan volume serbuk bentonit diratakan dengan cara diiris horisontal dengan pisau tipis tepat pada bagian atas wadah. Kemudian wadah berisi serbuk bentonit ditimbang (M_b). Rapat massa curah bentonit (ρ_b) ditentukan dengan persamaan: $\rho_b = \frac{M_b - M_k}{V_u}$ (1)

Penentuan Porositas Bahan Urug

Kolom gelas yang berisi bentonit dengan volume unggun tertentu, dialiri akuades dari buret melalui bagian bawah kolom. Pada saat aliran akuades tepat mencapai permukaan unggun bentonit dalam kolom, kran pada buret ditutup. Pengurangan volume akuades dalam buret dicatat (V_p) yang merupakan volume pori-pori partikel dan rongga antar partikel bentonit. Porositas bentonit (ε) ditentukan dengan persamaan: $\varepsilon = \frac{V_p}{V_u}$ (2)

Penjenuhan Bahan Urug (Pasir Kuarsa-Bentonit) dalam Kolom

Kolom gelas vertikal dengan diameter dalam d cm yang dilengkapi pipa pemasukan dan pengeluaran overflow diisi campuran bentonit dan pasir kuarsa dengan ketinggian L cm. Akuades dari bagian atas kolom dialirkan secara gravitasi ke dalam kolom sampai kelebihan akuades keluar lewat saluran overflow. Tinggi permukaan bentonit sampai dengan lubang overflow dicatat sebagai H cm. Kran bagian bawah kolom dibuka dan aliran akuades diganti dengan larutan umpan yang telah diketahui kadar uraniumnya (C_o) dalam penelitian ini = 500 ppm. Di bagian bawah, aliran ditampung. Setiap selang waktu tertentu (t menit), penampung diganti dan volume eluen dicatat (V_t). Kandungan uranium dalam aliran yang tertampung (C_t) dianalisis dengan spektrofotometer. Aliran dihentikan setelah keadaan jenuh tercapai yaitu aliran umpan masuk masuk = aliran keluar kolom berisi bentonit.

Penentuan permeabilitas (K)

Permeabilitas tanah ditentukan setelah tanah jenuh dengan akuades. Mula-mula kran *outlet* kolom terisi tanah yang telah jenuh ditutup, kemudian kolom tersebut diisi akuades sampai tinggi akuades dari permukaan unggun tanah atau *head loss* $H = 5$ cm. Kran *outlet* kolom tanah dibuka, maka akuades akan mengalir ke bawah secara gravitasi. Bersamaan dengan itu kran buret dibuka untuk menjaga agar ketinggian permukaan akuades di dalam kolom tanah tetap. Akuades yang keluar dari kolom ditampung dengan erlenmeyer 5 cm^3 , kemudian dicatat waktu alir akuades sampai effluen mencapai volume $V = 5 \text{ cm}^3$ sebagai t .

Menurut Simoen [10], permeabilitas medium padat berpori dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$K = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot (L + H)} \quad (3)$$

dengan K = konduktivitas hidraulik atau permeabilitas (cm/detik), V = volume effluen selama t (cm^3), H = tinggi *head* akuades dalam kolom terisi adsorben (cm), t = waktu alir sampai volume effluen V (detik), A = luas penampang lintang kolom terisi adsorben (cm^2), L = tinggi unggun adsorben dalam kolom (cm).

Penentuan Koefisien Distribusi, Faktor Retardasi, dan Dispersivitas

Interaksi antara nuklida dan adsorben, kemungkinan, disebabkan oleh mekanisme fisis dan kimia yang saling berhubungan dan sulit untuk didefinisikan sendiri-sendiri. Fenomena dasar ini secara khusus tidak dikenal dalam model. Beberapa pengaruh terhadap interaksi tersebut secara empiris dinyatakan dengan koefisien distribusi (K_d), yaitu suatu tetapan yang menyatakan perbandingan antara jumlah spesies kimia yang dijerap (diadsorpsi) dalam padatan dan konsentrasi spesies kimia dalam larutan yang berkontak dengan padatan [3, 8]. Nilai K_d pada proses *batch* ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut: $K_d = \frac{(C_o - C_e) \cdot w}{C_e \cdot V_e}$ (4)

dengan K_d = koefisien distribusi (cm^3/g), C_o = konsentrasi solut dalam influen (g/cm^3), C_e = konsentrasi solut dalam effluen (g/cm^3), w = berat adsorben (g), V_e = volum effluen (cm^3).

Apabila nilai koefisien distribusi untuk proses *batch* dalam persamaan (4) dijabarkan lebih lanjut untuk proses alir dalam kolom terisi adsorben dari media padat berpori, maka persamaan sebagai berikut akan diperoleh: $K_d = \frac{V_T \cdot C_o - \sum V_t \cdot C_t}{\sum V_t \cdot C_t} \cdot \frac{V_T}{w}$ (5)

dengan V_T = volum pada saat $C_i/C_o = 1$ (cm^3), C_o = konsentrasi solut ^{90}Sr awal dalam influen (Ci/cm^3), $\sum V_t \cdot C_t$ = akumulasi konsentrasi solut ^{90}Sr dalam

efluen sampai $C_t = C_o$ (μCi), w = berat unggun adsorben dalam kolom (g).

Berat unggun adsorben dalam kolom ditentukan dengan persamaan : $w = \rho_b \cdot v_b$ (6)

dengan ρ_b =rapat massa curah (*bulk density*) adsorben (g/cm^3), v_b =volum unggun adsorben (cm^3).

Faktor retardasi media berpori dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut [3, 8, 9] : $R = 1 + \frac{\rho_b K_d}{\varepsilon}$ (7)

dengan R = faktor retardasi, ε = porositas adsorben.

Menurut Guven [11], dispersivitas dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{3L}{16\pi} \frac{(t_{1,0} - t_{0,0})^2}{(t_{0,5})^2} \quad (8)$$

dengan L = jarak tempuh migrasi dalam unggun bentonit (cm), $t_{1,0}$ = waktu pada saat konsentrasi uranium dalam efluin $C_o = C_t$ (detik), $t_{0,5}$ = waktu pada saat $C_t/C_o = 0,5$ (detik), $t_{0,0}$ = waktu tinggal larutan dalam unggun bentonit (detik), dan $t_{0,0}$ dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$t_{0,0} = \frac{\varepsilon}{K} \left(\frac{L^2}{L+H} \right) \quad (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Analisis Sifat Fisik Campuran

Hasil percobaan menunjukkan bahwa formula *backfill material* dari campuran bentonit-pasir kuarsa mempunyai karakteristik fisis yang meliputi rapat massa curah, porositas, dan permeabilitas.

Dari Tabel 1 terlihat bahwa penambahan pasir kuarsa yang semakin banyak pada bentonit menunjukkan peningkatan rapat massa curah campuran bentonit-pasir kuarsa. Peningkatan rapat massa curah dimaksudkan agar dapat memberikan kekuatan menahan yang semakin besar untuk menopang beban berat tumpukan paket limbah radioaktif terimmobilisasi di dalam repositori pada penyimpanan limbah radioaktif.

Dari Tabel 2 terlihat bahwa berat bentonit yang semakin besar pada campuran bentonit - pasir

Tabel 1 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap rapat massa curah (ρ_b)

% Berat bentonit	Rapat massa curah, ρ_b (g/cm^3) pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	$\rho_b = 1,0400$ (g/cm^3) untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	0,8900	0,9079	0,9202
50	0,7778	0,7690	0,7389
75	0,6625	0,6574	0,6023
100	0,6000	0,5800	0,5300

kuarsa memberikan porositas yang semakin besar. Hal ini disebabkan oleh partikel mineral bentonit terdiri dari *sheets* atau lapisan-lapisan tipis dengan rongga yang terisi oleh molekul air serta ion alkali dan alkali tanah. Berat bentonit dalam campuran bentonit-pasir kuarsa yang semakin besar menyebabkan jumlah partikel bentonit yang semakin banyak, sehingga jumlah rongga antar lapisan tipis semakin banyak. Rongga antar lapisan tipis dalam partikel menyebabkan porositas efektif ε semakin besar.

Dari Tabel 3 terlihat bahwa ukuran partikel bentonit yang semakin kecil memberikan permeabilitas juga semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh penurunan ukuran partikel yang menyebabkan ukuran pori atau rongga antar partikel dalam unggun (bed) bentonit menjadi lebih kecil, sehingga kemampuan air untuk menerobos media padat berpori dari unggun bentonit tersebut semakin kecil dengan penurunan ukuran partikel bentonit.

Kajian Pemanfaatan Campuran sebagai Bahan Urug Uranium

Dari data analisis konsentrasi uranium dalam influen (C_o) dan konsentrasi uranium dalam influen (C_t) setiap 15 menit pada percobaan simulasi migrasi uranium dalam bahan urug dengan cara

Tabel 2 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap porositas (ε)

% Berat bentonit	Porositas, ε pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	$\varepsilon = 0,5519$ untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	0,5915	0,5610	0,5591
50	0,6638	0,5626	0,5600
75	0,7725	0,5740	0,5607
100	0,7920	0,7849	0,6360

Tabel 3 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap permeabilitas (K)

% Berat bentonit	Permeabilitas, K (cm/detik) pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	K = 6,7409 (cm/detik) untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	4,9885	4,1445	0,4083
50	2,7114	2,0606	0,3154
75	1,6982	1,4942	0,0909
100	1,3861	0,2199	0,0718

Tabel 4 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap koefisien distribusi (Kd)

% Berat bentonit	Koefisien distribusi, K_d (cm^3/g) pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	Kd = 1,8202 (cm^3/g) untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	4,2740	5,7083	10,0980
50	7,8495	13,1584	13,1644
75	9,5982	10,2331	13,5357
100	10,3996	12,9914	14,7600

Tabel 6 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap dispersivitas (α)

% Berat bentonit	Dispersivitas α (cm) pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	$\alpha = 0,4727$ cm untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	0,3498	0,2506	0,1606
50	0,3181	0,2180	0,0363
75	0,2737	0,2320	0,1689
100	0,3190	0,3101	0,2311

percobaan *fixed bed* yang dilakukan dalam kolom terisi campuran bentonit-pasir kuarsa dapat diperoleh koefisien distribusi uranium (Kd). Pengaruh ukuran dan % bentonit dalam campuran dapat dilihat pada Tabel 4.

Dari Tabel 4 terlihat bahwa semakin kecil ukuran partikel bentonit menyebabkan kenaikan Kd. Hal ini disebabkan oleh jumlah partikel bentonit semakin banyak pada volum unggun adsorben yang tetap dalam kolom percobaan. Dengan demikian, luas permukaan total partikel bentonit dalam kolom membesar supaya kontak antara larutan uranil nitrat dengan permukaan partikel bentonit terjadi. Luas kontak yang besar menyebabkan terjadinya penyerapan uranium oleh partikel bentonit baik secara pertukaran kation, filtrasi, dan penarikan kation uranium (UO_2^{2+}) dalam larutan uranil nitrat oleh bentonit pada kisi-kisi kristal yang bermuatan negatif akibat substitusi Al^{3+} oleh Si^{4+} secara isomorfis.

Dengan data rapat massa curah, porositas, dan koefisien distribusi uranium pada campuran bentonit-pasir kuarsa dari Tabel 1, 2, dan 3 serta persamaan (4), hasil perhitungan faktor retardasi formula *backfill material* dari campuran bentonit-pasir kuarsa yang ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5 Pengaruh ukuran butir bentonit dan % berat bentonit pada campuran bentonit-pasir kuarsa terhadap faktor retardasi (R)

% Berat bentonit	Faktor retardasi, R pada variasi ukuran butir bentonit		
	-20+40 mesh	-40+60 mesh	-60+80 mesh
0	R = 4,430 (cm^3/g) untuk pasir kuarsa -20+40 mesh		
25	7,430	10,230	17,620
50	10,200	13,890	18,370
75	9,060	12,720	15,540
100	9,030	10,600	13,500

Dari Tabel 5 terlihat bahwa formula bahan urug dari campuran bentonit-pasir kuarsa pada berat bentonit 50% dari berat campuran memberikan faktor retardasi terbesar dibandingkan dengan berat bentonit 25% dan 75%. Pengecilan ukuran partikel memberikan faktor retardasi yang semakin besar. Hal tersebut disebabkan oleh berat bentonit 50% dari berat campuran bernilai ρ_b dan Kd relatif besar, sehingga R juga membesar. Kandidat bahan urug dari campuran bentonit-pasir kuarsa dengan formula dari bentonit -60+80 mesh dengan berat 50% dari berat campuran memberikan faktor retardasi terbesar yaitu R = 18,370.

Dari data analisis konsentrasi uranium dalam influen (C_o) dan konsentrasi uranium dalam influen (C_t) setiap 15 menit pada percobaan simulasi migrasi uranium dalam bahan urug dengan cara percobaan *fixed bed* yang dilakukan dalam kolom terisi campuran bentonit-pasir kuarsa dan bantuan persamaan (6) dan (7), hasil perhitungan dispersivitas (α) ditunjukkan pada Tabel 6.

Dari Tabel 6 terlihat bahwa ukuran partikel bentonit yang semakin kecil juga berpengaruh pada nilai dispersivitas α yang semakin kecil. Hal ini disebabkan oleh rongga antar partikel yang berukuran kecil, sehingga kecepatan aliran larutan yang melewati unggun bentonit semakin lambat. Karena kecepatan aliran melambat, maka waktu tinggal $t_{0,0}$ larutan dalam bentonit membesar. Nilai $t_{0,0}$ yang semakin besar tersebut dimasukkan dalam persamaan (6), maka nilai dispersivitas akan mengecil. Kandidat bahan urug dari campuran bentonit-pasir kuarsa dengan formula dari bentonit -60+80 mesh dengan berat 50% dari berat campuran memberikan dispersivitas terkecil, yaitu $\alpha = 0,0363$.

KESIMPULAN

Penelitian ini dapat disimpulkan, bahwa kandidat bahan urug yang baik adalah formula dari campuran antara 50% pasir kuarsa berukuran -20+40 mesh dengan 50% bentonit berukuran -60+80 mesh yang

memberikan faktor retardasi terbesar, yaitu $R = 18,370$ dan dispersivitas terkecil, yaitu $\alpha = 0,0363$ cm. Formula dari campuran bentonit-pasir kuarsa dapat digunakan sebagai kandidat bahan urug pada penyimpanan limbah radioaktif tanah dangkal (PLTD).

DAFTAR PUSTAKA

1. Lopez, R.S. and Johnson, L.H., 1986, *Vault Sealing Research and Development for the Canadian Nuclear Fuel Waste Management*, Atomic Energy of Canada Limited - 9053
2. LeNeveu, D.M., 1986, *Vault Submodel for the Second Interim Assesment of the Canadian Concept for Nuclear Fuel Waste Disposal : Post-Closure Phase*, Atomic Energy of Canada Limited - 8383
3. Aoki, M.M.M, Takizawa, M. and Takahashi, M., 1984, *Waste Management*, 2, 495-501
4. Miyahara, K. Sasaki, N., 1991, *Radiochemica Acta*, 52/53, 293-297
5. Conca, J.L., Ashida, T., and Sato, H., 1991, *Waste Management*, 2, 1382-1389
6. Kanwar, R., and Wattal, P.R., 1983, *Conditioning of Low Heat Generating Waste by Incorporation in Barrier Impregnated Composite Matrice, A Review of Experience in Industrial Scale Operation*, Proceeding of Symposium Utrecht, IAEA, Vienna
7. Verstricht, J., Demarche, M., and Gatabin, C., 2001, *Development of Backfill Material within the Belgium Concept for Geological Disposal of High-Level Radioactive Waste : An Example of Successful International Co-operation*, Waste Management Conceference, Tucson Arizona
8. Champ, D.R., Moltyaner, G.L., Young, J.L. and Lapcevic, P., 1985, *A Downhole Column Technique for Filed Measurement of Transport Parameter*, AECL-8905
9. Schneider, K., 1982, *Site Investigation for Repositories for Solid Radioactive Wastes in Shallow Ground*, Technical Report Series No. 216, Vienna
10. Simoen, S. dan Purnama, Ig.S., 1992, *Petunjuk Praktikum Geohidrologi*, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
11. Guven, R.W., 1985, *Analysis and Interpretation of Single-Well Tracer Test in Stratified Aquifer*, Water Resource Research 21, 5