

THE USE OF FLY ASH AND ZEOLITE MIXTURE AS BACKFILL MATERIAL IN THE RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY

Penggunaan Abu Layang dan Zeolit sebagai Bahan Urug pada Penyimpanan Limbah Radioaktif

Herry Poernomo^{a,*}, Noor Anis Kundari^b, and Burhani J.W.^b

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

^b Polytechnic Institute of Nuclear Technology
National Nuclear Energy Agency, Babarsari Street P.O. Box 6101 Ykbb Yogyakarta 55281

Received 21 September 2005; Accepted 7 October 2005

ABSTRACT

An investigation of the contribution of fly ash in the fly ash-zeolite mixture as the backfill material on the shallow land burial of radioactive waste has been done. The experiment objective is to know the effect of zeolite particle size and fly ash-zeolite weight ratio on physical properties such as permeability (K) and dispersion characteristic such as effective dispersion coefficient (D_e) in the fly ash-zeolite form as backfill material. The experiment was carried out by the fixed bed method in the column filled by the fly ash-zeolite mixture with a fly ash-to-zeolite weight percent ratio of 100/0, 80/20, 60/40, 40/60, 20/80, 0/100 in 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 , data effective dispersion coefficient (D_e) in the backfill material were determined. The experiment data showed that -400 mesh fly ash and -70+80 mesh zeolite on fly ash-to-zeolite with weight percent ratio of 40/60 with $K = 5.00 \times 10^{-5}$ cm/second and $D_e = 1.11 \cdot 10^{-5}$ cm²/second can be used as backfill material.

Keywords: backfill material, fly ash, radioactive waste, zeolite

PENDAHULUAN

Pemerintah melalui beberapa institusi yang terkait dalam bidang energi dan DPR telah menetapkan bahwa PLTN yang pertama direncanakan dapat dioperasikan pada tahun 2016 sebagai bagian dari penyediaan energi nasional adalah PLTN di Semenanjung Muria Jepara. Dalam rangka mengantisipasi terhadap limbah radioaktif yang akan ditimbulkan oleh operasi PLTN beserta fasilitas litbang dan fabrikasi elemen bakar nuklir, maka perlu diteliti tentang pembuatan formula bahan urug dari bahan mineral lokal sebagai bagian penting dari fasilitas penyimpanan limbah radioaktif pada sistem pengelolaan limbah radioaktif secara lengkap.

Untuk memenuhi ketentuan keselamatan lingkungan pada penyimpanan limbah radioaktif seperti dipersyaratkan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA), penyimpanan lestari limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang dapat dilakukan dengan sistem penyimpanan dekat permukaan (*near surface disposal*) atau sistem penyimpanan tanah dangkal (*shallow land burial*) yang berupa bangunan repositori dari beton

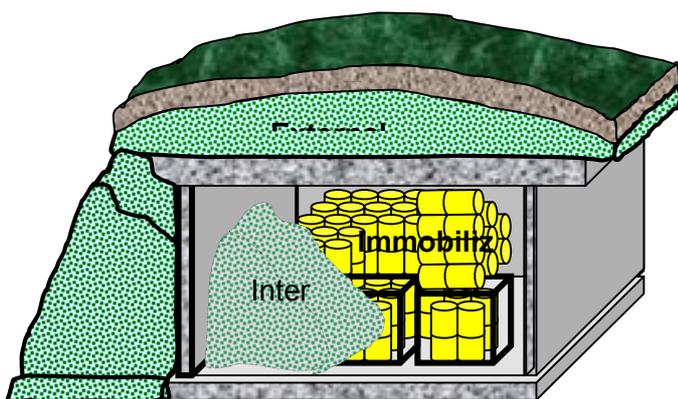
bertulang dengan kualitas baik pada lokasi yang terpilih. Repositori yang baik harus mempunyai sistem penghalang ganda (*multibarrier system*) yang terdiri dari penghalang rekayasa (*engineered barrier*) dan penghalang alami (*natural barrier*) seperti yang diilustrasikan oleh Dixon [1] dalam model penyimpanan limbah radioaktif sistem tanah dangkal yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Salah satu bagian dari penghalang rekayasa adalah bahan urug (*backfill material*) dengan menggunakan bahan mineral lokal seperti zeolit, bentonit, kuarsa, lempung, dan abu layang yang berfungsi menghambat migrasi radionuklida dari paket limbah radioaktif terimmobilisasi dalam repositori ke lingkungan tanah di sekitarnya yang berperan sebagai penghalang alami.

Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral melalui kerjasama PLN dengan konsorsium swasta asing dan nasional akan membangun 8 buah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yaitu PLTU Tanjungjati A dan B berbahan bakar batubara di daerah Jepara. Pembangunan dua PLTU di Tanjungjati B sedang dalam taraf penyelesaian dan direncanakan sudah mulai beroperasi secara komersial pada Oktober 2006. PLTU menghasilkan

* Corresponding author.

Email address : herry_pnm@yahoo.com



Gambar 1 Model penyimpanan limbah radioaktif sistem tanah dangkal

limbah abu layang (*fly ash*) yang terbawa oleh gas buangan dari pembakaran batubara. Gas buang tersebut mengandung partikel-partikel abu yang sangat lembut. Abu ini tertahan pada pengendap debu elektrostatis (*electrostatic presipitator*) sebelum keluar bersama udara panas pembakaran.

Di Indonesia abu layang digunakan secara komersial sebagai semen portland-pozzolan yang telah banyak beredar dan dijual di toko-toko material bahan bangunan. Di Australia, abu layang digunakan secara komersial sebagai material jalan raya untuk menggantikan peran pasir sebagai campuran pada pengaspalan jalan raya. Menurut Ziemkiewicz [2], abu layang telah banyak digunakan antara lain untuk reklamasi tanah bekas penambangan mineral dan minyak bumi yaitu sebagai penyerap lumpur bahan galian tambang yang bersifat asam dan lucutan ion-ion logam dan fluoride dari lucutan lumpur minyak bumi. Menurut Chou [3] dan Rebeiz [4], abu layang selain digunakan sebagai bahan baku pembuatan bata untuk bahan bangunan, juga digunakan sebagai pengisi untuk pembuatan komposit poliesther. Abu layang yang dihasilkan dari PLTU di Amerika Serikat menurut Paul [5] juga telah banyak dimanfaatkan sebagai bahan penyerap (*sorbent*) lucutan yang berasal dari lokasi penguburan limbah perkotaan atau *landfill*.

Cogburn [6] dari *Department of Energy* (DOE) USA dan Lopez [7] dari *Atomic Energy of Canada Limited* (AECL) telah melakukan penelitian terhadap abu layang sebagai calon bahan urug (*backfill material*) dan bahan penyangga (*buffer material*) pada sistem penyimpanan limbah radioaktif.

Berdasarkan hal tersebut, maka limbah abu layang dari PLTU di Indonesia dimungkinkan dapat dimanfaatkan sebagai aditif bahan urug pada penyimpanan limbah radioaktif. Kemampuan abu layang untuk dapat dijadikan calon aditif bahan urug antara lain dengan cara mengetahui sifat fisik (densitas ruah, porositas, permeabilitas), koefisien

distribusi, dispersivitas dan koefisien dispersi efektif radionuklida pada abu layang-zeolit sebagai formula calon bahan urug.

Penelitian ini bertujuan menentukan sifat fisik (densitas ruah, porositas, permeabilitas), koefisien distribusi, dispersivitas, dan koefisien dispersi efektif uranium pada abu layang-zeolit sebagai formula bahan urug pada penyimpanan limbah radioaktif.

METODE PENELITIAN

Pembuatan Serbuk Zeolit dan Abu Layang

Bongkahan kecil zeolit dari Nglipar, Gunung Kidul dikeringkan dalam oven sampai berat yang tetap, kemudian digerus sampai menjadi serbuk. Serbuk zeolit dimasukkan dalam panci ayakan standar ASTM ISO 565-R20 yang disusun dari atas ke bawah yaitu 16 dan 30 mesh, kemudian diayak. Hasil pengayakan diambil dari panci ayakan 30 mesh sehingga diperoleh partikel zeolit dengan ukuran $-16+30$ mesh. Dilakukan dengan cara yang sama dengan menggunakan ayakan masing-masing dengan susunan dari atas ke bawah yaitu 30 dan 40 mesh, 40 dan 50 mesh, 50 dan 60 mesh, 60 dan 70 mesh, 70 dan 80 mesh sehingga diperoleh zeolit dengan ukuran berturut-turut $-30+40$ mesh, $-40+50$ mesh, $-50+60$ mesh, $-60+70$ mesh, $-70+80$ mesh. Abu layang dari PLTU Suralaya diayak pada panci ayakan 400 mesh standar ASTM ISO 565-R20 sehingga diperoleh serbuk abu layang dengan ukuran -400 mesh.

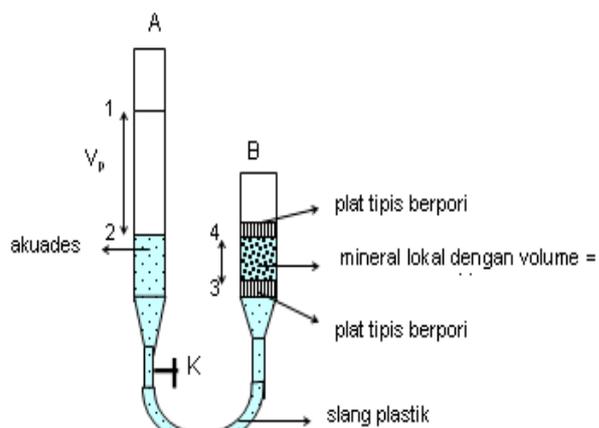
Penentuan Densitas Ruah Serbuk Zeolit dan Abu Layang dengan Metoda ASTM D1895B A21.A

Akuades dialirkan dari buret ke dalam wadah silindris sampai tepat bagian atas wadah. Pengurangan akuades dalam buret dicatat sebagai (V_b), yang merupakan volumee unggun. Serbuk zeolit dimasukkan secara curah ke dalam wadah yang telah diketahui volume wadah (V_b) dan berat wadah (M_k) sampai melebihi volumee wadah. Kelebihan volumee serbuk zeolit diratakan dengan cara diiris horisontal dengan pisau tipis tepat pada bagian atas wadah. Kemudian wadah berisi serbuk zeolit ditimbang (M_b). Desitas ruah zeolit (ρ_b) ditentukan dengan persamaan :

$$\rho_b = \frac{M_b - M_k}{V_b} \quad (1)$$

Penentuan Porositas Serbuk Zeolit dan Abu Layang

Penentuan porositas sampel dilakukan seperti Gambar 2. Kolom gelas B yang berisi serbuk



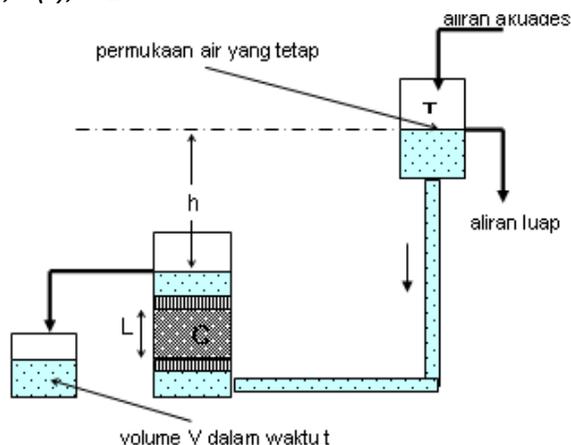
Gambar 2 Rangkaian peralatan penentuan porositas efektif

mineral lokal (zeolit atau abu layang) dengan volume unggun tertentu misal V_u dialiri akuades yang dialirkan dari buret A melalui bagian bawah kolom gelas B. Saat aliran akuades tepat pada bagian bawah unggun serbuk mineral lokal di batas 3 pada kolom gelas B, maka kran K pada buret A ditutup. Dicatat volume pada batas 1, kemudian dialirkan akuades ke dalam serbuk mineral lokal dalam kolom gelas B dengan cara kran K dibuka kembali. Setelah semua serbuk mineral lokal dalam kolom gelas B terlihat basah oleh aliran akuades sampai batas 4, maka kran K ditutup kembali. Dicatat pengurangan volume akuades dalam buret dari batas 1 ke 2 misal V_p , yang merepresentasikan volume pori-pori partikel dan rongga antar partikel serbuk mineral lokal dalam kolom gelas B. Menurut LeNeveu [8] dan Ven Te Chow [9], porositas efektif (ϵ) partikel padat berpori ditentukan dengan persamaan :

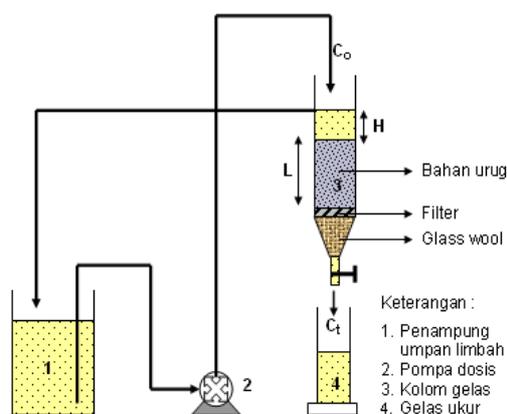
$$\epsilon = V_p / V_u \quad (2)$$

Penentuan Permeabilitas (K) Secara Constant Head

Penentuan porositas sampel dilakukan seperti Gambar 3. Kolom gelas vertikal C dengan diameter dalam $d = 1,75$ cm yang dilengkapi pipa pemasukan dan pengeluaran *overflow* diisi serbuk mineral lokal dengan ukuran partikel tertentu pada ketinggian $L = 10$ cm. Penampung T yang dilengkapi pipa pengeluaran secara gravitasi dan pipa pengeluaran *overflow* diisi akuades dengan tinggi *head loss* $h = 50$ cm. Dialirkan akuades dari penampung T secara gravitasi ke dalam kolom C dari bagian bawah, aliran dihentikan setelah tercapai keadaan jenuh yaitu aliran masuk (influen) = aliran keluar kolom berisi serbuk mineral lokal (efluen). Setelah jenuh kran pengeluaran pada penampung T ditutup, selanjutnya mulai dilakukan pengukuran waktu alir (t) sampai volume efluen $V = 5$ cm³. Dilakukan langkah percobaan seperti di atas untuk ukuran



Gambar 3 Rangkaian peralatan penentuan permeabilitas secara constant head



Gambar 4. Rangkaian peralatan penentuan sorpsi dan dispersi uranium dalam bahan urug

partikel serbuk mineral lokal yang bervariasi. Menurut Ven Te Chow [8], permeabilitas dapat ditentukan secara *constant head* dengan persamaan sebagai berikut :

$$K = \frac{V.L}{A.t.h} \quad (3)$$

dengan V = volume efluen dalam waktu t (cm³), L = tinggi unggun serbuk mineral lokal dalam kolom (cm), A = luas penampang kolom terisi serbuk mineral lokal (cm²), t = waktu penampungan V (detik), h = *head loss* (cm).

Penentuan Koefisien Distribusi, Dispersivitas dan Koefisien Dispersi Efektif Uranium pada Formula Abu Layang-Zeolit sebagai Bahan Urug

Percobaan dilakukan seperti Gambar 4 dengan menggunakan kolom terisi sampel campuran abu layang-zeolit yang telah dijenuhkan dengan akuades. Akuades di atas sampel abu layang-zeolit dalam kolom dikeluarkan melalui bagian bawah kolom. Pada saat permukaan akuades tepat segaris dengan permukaan sampel abu layang-zeolit dalam kolom, pompa dosis dihidupkan, sehingga umpan limbah simulasi Uranium sebagai influen masuk dari atas kolom.

Pada saat influen tepat menyentuh saringan bagian atas unggun sampel dalam kolom, mulai dicatat waktu alir influen. Efluen yang ke luar dari bagian bawah kolom ditampung dalam gelas ukur, kemudian diambil setiap 15 menit, dicuplik sebanyak 1 cm³, dimasukkan ke dalam labu ukur 5 cm³, ditambahkan larutan arsenazo 0,5 cm³, kemudian volume ditepatkan dengan HNO₃ 3M sampai garis tanda. Digojog sampai homogen, didiamkan 15 menit agar bereaksi sempurna. Selanjutnya dianalisis dengan spektrofotometer pada panjang gelombang maksimum. Analisis absorbansi uranium dalam efluen diakhiri setelah diperkirakan tercapai keadaan setimbang, artinya konsentrasi uranium dalam efluen sama dengan konsentrasi uranium dalam larutan umpan (influen).

Interaksi antara nuklida dan adsorben, kemungkinan, disebabkan oleh mekanisme fisik 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). Menurut Lopez [7] dan Champ [10], koefisien distribusi adalah suatu tetapan yang menyatakan perbandingan antara jumlah spesies kimia yang dijerap (diadsorpsi) dalam padatan dan konsentrasi spesies kimia dalam larutan yang berkontak dengan padatan. Nilai K_d pada proses secara *batch* ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$K_d = \frac{(C_o - C_e) / w}{C_e / V_e} \quad (4)$$

dengan K_d = koefisien distribusi (cm³/g), C_o = konsentrasi solut dalam influen (g/cm³), C_e = konsentrasi solut dalam efluen (g/cm³), w = berat adsorben (g), V_e = volume efluen (cm³).

Menurut Poernomo [11], penentuan koefisien distribusi pada proses alir dalam kolom terisi adsorben dari media padat berpori dinyatakan dengan persamaan :

$$K_d = \frac{V_T \cdot C_o - \sum V_t \cdot C_t}{\sum V_t \cdot C_t} \cdot \frac{V_T}{w} \quad (5)$$

dengan V_T = volume pada saat C_t/C_o = 1 (cm³), C_o = konsentrasi solut ⁹⁰Sr awal dalam influen (μCi/cm³), ΣV_t.C_t = akumulasi konsentrasi solut ⁹⁰Sr dalam efluen sampai C_t = C_o (μCi), w = berat unggun adsorben dalam kolom (g).

Berat unggun adsorben dalam kolom ditentukan dengan persamaan :

$$w = \rho_b \cdot v_b \quad (6)$$

dengan ρ_b = densitas ruah (*bulk density*) adsorben (g/cm³), v_b = volume unggun adsorben (cm³)

dinyatakan dengan persamaan v_b = (π/4) .d² . L, dengan d = diameter kolom (cm), L = tinggi unggun adsorben dalam kolom (cm).

Menurut Guven [12], dispersivitas dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{3.L}{16.\pi} \frac{(t_{1,0} - t_{0,0})^2}{(t_{0,5})^2} \quad (7)$$

dengan L = jarak tempuh migrasi uranium dalam unggun zeolit (cm), t_{1,0} = waktu pada saat konsentrasi uranium dalam efluen C_o = C_t (menit), t_{0,5} = waktu pada saat C_t/C_o = 0,5 (menit), t_{0,0} = waktu tinggal larutan dalam unggun zeolit (menit), dan t_{0,0} dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$t_{0,0} = \frac{L.A}{Q.\varepsilon} = \frac{\pi.d^2.L}{4.Q.\varepsilon} \quad (8)$$

dengan L = tinggi unggun penjerap dalam kolom (cm), A = luas penampang unggun penjerap dalam kolom (cm²), Q = debit aliran masuk kolom (cm³/menit), ε = porositas unggun penjerap dalam kolom, d = diameter dalam kolom (cm).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh ukuran partikel terhadap sifat fisik campuran dimaksudkan untuk mendapatkan ukuran partikel dengan karakteristik fisik yang terbaik. Karakteristik fisik meliputi densitas ruah (ρ_b), porositas (ε), dan permeabilitas (K) yang disajikan dalam Tabel 1.

Pada Tabel 1 menunjukkan bahwa sampel dengan ukuran partikel yang semakin kecil maka densitas ruah semakin besar. Hal ini dapat dipahami karena pada volume wadah V_u yang tetap, dengan ukuran partikel yang semakin kecil maka semakin memperbesar jumlah partikel yang mengisi volume tersebut. Jumlah partikel yang semakin banyak menyebabkan berat sampel akan semakin besar.

Tabel 1 Pengaruh ukuran partikel terhadap karakteristik fisik

Mineral	Ukuran partikel (mesh)	Karakteristik fisik		
		ρ _b , g/cm ³	ε	K, cm/dt
Zeolit	-16 +30	0,630	0,626	6,201. 10 ⁻²
	-30+40	0,640	0,631	3,695. 10 ⁻²
	-40+50	0,644	0,665	1,635. 10 ⁻²
	-50+60	0,654	0,693	9,985. 10 ⁻³
	-60+70	0,682	0,710	4,410. 10 ⁻³
Abu layang	-70+80	0,659	0,737	4,064. 10 ⁻³
	-400	1,581	0,657	5,404. 10 ⁻⁵

Dari Tabel 1 terlihat bahwa sampel dengan ukuran partikel yang semakin kecil, maka porositas efektif (ϵ) semakin besar. Hal ini dapat dipahami karena pada ukuran partikel yang semakin kecil pada volumee unggun yang tetap, maka jumlah partikel dengan rongga dalam (*internal pore*) dan jumlah rongga antar partikel dalam unggun atau yang biasa disebut rongga luar (*external pore*) akan bertambah besar. Porositas efektif semakin besar untuk ukuran partikel yang semakin kecil tersebut telah sesuai dengan teori yang dinyatakan oleh Ven Te Chow [9]. Semakin kecil ukuran partikel menyebabkan ukuran *internal pore* masing-masing partikel dan pori antar partikel menjadi lebih kecil. Pori antar partikel saling berhubungan satu dengan yang lain membentuk tortuositas yaitu saluran kecil (kapiler) yang berbelit dan berbelok. Kapiler yang terbentuk dari rongga antar pori yang saling berhubungan tersebut dengan jumlah belokan yang semakin banyak menyebabkan permeabilitas dan kecepatan alir semakin kecil.

Nilai karakteristik fisik di atas yaitu densitas ruah (ρ_b), porositas (ϵ), dan permeabilitas (K) selanjutnya ditentukan sebagai parameter unjuk kerja sampel yang akan dipilih sebagai calon bahan urug. Untuk memilih ukuran partikel dengan tinjauan terhadap karakteristik fisik, maka dilakukan penilaian/pengharkatan (*scoring*) terhadap ρ_b , ϵ , dan K. Hasil *scoring* karakteristik fisik yang diwakili ρ_b , ϵ , dan K ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 Hasil penilaian karakteristik fisik zeolit

Ukuran partikel, mesh	Karakteristik fisik			Σ Nilai
	Nilai ρ_b	Nilai ϵ	Nilai K	
-16 +30	1	1	1	3
-30+40	2	2	2	6
-40+50	3	3	3	9
-50+60	4	4	4	12
-60+70	6	5	5	16
-70+80	5	6	6	17

Ditinjau dari hasil nilai karakteristik fisik pada variasi ukuran partikel zeolit di atas, maka zeolit dengan ukuran -70+80 mesh adalah yang terbaik dengan jumlah nilai karakteristik fisik 17. Berdasarkan hal tersebut, maka zeolit dengan ukuran -70+80 mesh dapat digunakan sebagai calon campuran bahan urug.

Komposisi campuran bahan urug untuk menjerap radionuklida dalam penelitian ini yaitu dengan mencampurkan zeolit pada ukuran -70+80 mesh dengan abu layang ukuran -400 mesh.

Penelitian ini dimaksudkan untuk mendapatkan perbandingan berat bahan yang terbaik dengan mengetahui karakteristik fisik yang terbaik. Pengaruh perbandingan berat campuran abu layang-zeolit terhadap karakteristik fisik ditunjukkan pada Tabel 3.

Abu layang ini digunakan sebagai bahan tambahan yang dapat mengisi rongga-rongga antar partikel zeolit. Penambahan ini akan memberikan kontribusi kepada zeolit, yaitu dapat memperbaiki karakteristik fisik yaitu densitas ruah dan porositas campuran menjadi lebih besar, permeabilitas campuran menjadi lebih kecil.

Densitas ruah yang membesar dapat meningkatkan kekuatan mekanik bahan urug untuk menahan beban/menyangga tumpukan wadah limbah radioaktif dalam repositori sebagaimana yang dipersyaratkan oleh *Atomic Energy Canada Limited* dalam Lopez [7].

Ukuran partikel adsorben yang semakin kecil dalam kolom percobaan memberikan jumlah luas permukaan partikel adsorben dan porositas efektif menjadi lebih besar. Porositas efektif yang semakin membesar akan memperbanyak jumlah larutan yang mengisi pori-pori dalam unggun (*bulk*) adsorben, maka frekuensi kontak antara partikel adsorben dengan larutan yang mengandung uranium lebih besar sehingga penjerapan uranium oleh zeolit menjadi lebih besar. Permeabilitas campuran yang semakin kecil akan memperlambat aliran limbah, aliran limbah yang lambat ini akan memberikan kontribusi waktu kontak limbah dengan adsorben akan lebih maksimal.

Tabel 3. Pengaruh perbandingan berat campuran terhadap karakteristik fisik

Komposisi abu layang zeolit, % b/b	Karakteristik fisik						Σ nilai
	ρ g/cm ³	Nilai ρ	ϵ	Nilai ϵ	K cm/dt	Nilai K	
100/0	1,581	6	0,657	1	$5,404 \cdot 10^{-5}$	3	10
80/20	1,432	5	0,662	2	$5,312 \cdot 10^{-5}$	4	11
60/40	1,382	4	0,681	3	$5,143 \cdot 10^{-5}$	5	12
40/60	1,302	3	0,702	5	$5,004 \cdot 10^{-5}$	6	14
20/80	0,933	2	0,700	4	$8,977 \cdot 10^{-5}$	2	8
0/100	0,649	1	0,737	6	$4,064 \cdot 10^{-3}$	1	8

Tabel 4. Pengaruh komposisi campuran terhadap koefisien distribusi (K_d), dispersivitas (α) dan koefisien dispersi efektif (D_e)

Bahan urug (% berat)	Koefisien distribusi, K_d (cm^3/g)	Karakteristik dispersi	
		A (cm)	D_e (cm^2/detik)
Zeolit = 100%	36,251	0,818	$1,393 \cdot 10^{-3}$
Abu layang = 100%	7,859	0,673	$3,196 \cdot 10^{-5}$
Abu layang/zeolit = 40 / 60 %	25,079	0,612	$1,108 \cdot 10^{-5}$

Ditinjau dari hasil peringkat nilai karakteristik fisik pada variasi komposisi campuran abu layang-zeolit di atas, maka komposisi abu layang-zeolit dengan % b/b = 40/60 adalah yang terbaik dengan jumlah peringkat nilai karakteristik fisik 14. Berdasarkan hal tersebut, maka komposisi abu layang-zeolit 40/60 % berat digunakan sebagai calon campuran bahan urug.

Proses adsorpsi limbah uranium oleh campuran bahan urug dengan cara mengontakkan bahan dengan larutan limbah secara sinambung. Dalam penelitian ini pH limbah, konsentrasi limbah, kecepatan influen, diameter kolom dan tinggi kolom dibuat tetap. Bahan penyerap yang digunakan tidak dikenakan perlakuan awal (aktivasi).

Berdasarkan analisis konsentrasi UO_2^{2+} dalam influen dan efluen larutan limbah uranium menurut percobaan, data yang diperoleh dapat dihitung koefisien distribusi yang menyatakan banyaknya UO_2^{2+} dalam larutan yang terjerap oleh bahan urug, dispersivitas dan koefisien dispersi efektif yang menyatakan difusi UO_2^{2+} dalam bahan urug karena adanya beda konsentrasi UO_2^{2+} dalam larutan dan dalam partikel serta karena konveksi yaitu adanya fluida yang mengalir. Pengaruh formula bahan urug terhadap karakteristik sorpsi dan dispersi uranium ditunjukkan pada Tabel 4.

Hasil penelitian seperti dalam Tabel 4 dapat dijelaskan bahwa koefisien distribusi (K_d) mineral zeolit terhadap nuklida uranium sebesar $36,25 \text{ cm}^3/\text{g}$. Hal ini disebabkan mineral zeolit yang dipergunakan adalah zeolit alam tanpa dilakukan aktivasi. Zeolit alam mengandung pengotor yang terdiri dari kation-kation (K, Na, Ca, Ba, Mg, Fe) yang berada dalam celah-celah dari kisi kristal aluminosilikat zeolit untuk menjaga kristal bermuatan netral. Dengan demikian kemampuan kation uranium (UO_2^{2+}) untuk menukar kation-kation pengotor dalam zeolit alam menjadi kurang optimum apabila dibandingkan dengan zeolit hasil aktivasi. Hal ini bisa dipahami karena pada zeolit aktif, maka kation UO_2^{2+} hanya menukar kation sejenis H^+ pada H-zeolit atau Na^+ pada Na-zeolit. Abu layang memberikan koefisien distribusi uranium (K_d) sebesar $7,86 \text{ cm}^3/\text{g}$, hasil ini lebih kecil daripada K_d bahan penyerap zeolit alam. Hal ini bisa dipahami karena sorpsi solut yang terjadi dalam zeolit disebabkan oleh sorpsi fisik dan kimia sedangkan pada abu layang hanya terjadi sorpsi

fisik. Sorpsi fisik yaitu molekul uranium yang kemungkinan berupa endapan $\text{U}(\text{OH})_2$ karena adanya OH^- dalam larutan akan terfiltrasi pada pori antar partikel dan menempel pada permukaan partikel. Sorpsi kimia dapat terjadi karena kation alkali dan alkali tanah dalam zeolit di luar struktur kerangka aluminasilika akan ditukar oleh kation UO_2^{2+} yang afinitasnya lebih besar. Sorpsi kimia dapat terjadi juga karena pengikatan kation UO_2^{2+} oleh kisi-kisi kristal aluminasilika yang bermuatan negatif disebabkan oleh adanya penggantian Si^{4+} oleh Al^{3+} secara isomorphous pada lapisan tetrahedral.

Penambahan abu layang dalam campuran akan mengurangi kapasitas serapan bahan. Kapasitas serapan yang menurun ini disebabkan karena sebagian zeolit yang mempunyai kapasitas serapan yang relatif besar, diganti oleh abu layang yang mempunyai kapasitas serapan yang relatif lebih kecil daripada zeolit alam..

Mekanisme dispersi massa dalam unggun (*bulk*) media padat berpori disebabkan karena adanya kecepatan aliran fluida dan beda konsentrasi yang terjadi secara simultan yang diwakili oleh koefisien dispersi efektif (D_e). Penilaian terhadap D_e pada bahan urug didasarkan pada kemampuan fisik dan kimia zeolit dan abu layang untuk menahan difusi ion yang dinyatakan dengan koefisien dispersi efektif yang disebabkan oleh perbedaan konsentrasi dan kecepatan aliran. Koefisien dispersi efektif akan memberikan kontribusi yang besar terhadap bahan urug apabila D_e semakin kecil. Pada Tabel 4 menunjukkan bahwa zeolit mempunyai nilai D_e yang relatif besar bila dibandingkan dengan abu layang. Hal ini disebabkan karena kecepatan alir linier (V_w) dari mineral zeolit lebih besar bila dibandingkan dengan abu layang.

Penambahan abu layang dalam campuran akan memperkecil kecepatan linier (V_w). Kecepatan linier yang kecil menjadikan kontak antara UO_2^{2+} dengan zeolit semakin lama, sehingga kemampuan struktur partikel zeolit untuk menjerap UO_2^{2+} dapat lebih maksimal. Dengan demikian menyebabkan transfer massa UO_2^{2+} dari konsentrasi yang tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah mengalami penurunan. Mekanisme penjerapan UO_2^{2+} dalam fluida yang mengalir oleh partikel zeolit terjadi pada permukaan, ujung, dan kisi-kisi kristal zeolit. Hal ini

yang menyebabkan zeolit bersifat sebagai penyaring molekul dan penukar ion.

Dari pembahasan di atas terlihat bahwa komposisi campuran abu layang-zeolit pada komposisi 40/60 % berat memberikan hasil karakteristik fisik (densitas, porositas, permeabilitas), karakteristik sorpsi (koefisien distribusi) dan karakteristik dispersi (dispersivitas dan koefisien dispersi) yang terbaik. Pada komposisi ini, maka kedua bahan pada campuran saling menguatkan. Zeolit mempunyai koefisien distribusi yang relatif besar, koefisien dispersi efektif yang besar, densitas yang kecil, porositas dan permeabilitas yang relatif besar. Abu layang mempunyai koefisien distribusi yang relatif kecil, koefisien dispersi yang relatif rendah, densitas yang tinggi, porositas dan permeabilitas yang relatif kecil. Oleh karena itu zeolit terutama digunakan sebagai penukar ion, sedangkan abu layang digunakan untuk memperbaiki kualitas fisik yaitu sebagai penahan terhadap kondisi lingkungan, karena zeolit mempunyai sifat tidak tahan terhadap radiasi dan asam, konduktivitas panas yang rendah, dan masih banyak hal yang lainnya. Dengan demikian bila zeolit digunakan sebagai bahan urug masih banyak kekurangannya, maka zeolit tersebut perlu ditambah abu layang dengan kandungan mineral terbanyak adalah kuarsa dan munit yang mempunyai sifat stabil terhadap pengaruh kimia-fisik seperti suhu, tekanan dan kondisi air tanah seperti yang dipersyaratkan oleh *Atomic Energy Canada Limited* dalam Lopez [7].

Formula bahan urug dari campuran abu layang-zeolit pada komposisi 40/60 % berat memberikan karakteristik fisik yang diwakili oleh permeabilitas (K) sebesar $5,00 \times 10^{-5}$ cm/detik dan karakteristik dispersi yang diwakili oleh koefisien dispersi efektif (D_e) uranium sebesar $1,11 \times 10^{-5}$ cm²/detik. Hasil penelitian yang dilakukan oleh Lopez [7] memberikan data K bahan urug sebesar $5,3 \times 10^{-4}$ s.d. $5,1 \times 10^{-9}$ cm/detik. Sedangkan LeNeveu [8] mendapatkan koefisien difusi molekuler dalam air (D_o) di sekitar penyimpanan limbah radioaktif sebesar $3,21 \times 10^{-6}$ s.d. $1,61 \times 10^{-5}$ cm²/detik. Apabila data K dan D_e hasil penelitian ini dibandingkan dengan data K dan D_o dari penelitian Lopez [7] dan LeNeveu [8], maka formula bahan urug dari campuran abu layang-zeolit dengan komposisi 40/60 % berat dapat dijadikan calon bahan urug pada penyimpanan limbah radioaktif sistem tanah dangkal.

KESIMPULAN

Hasil penelitian ini dapat disimpulkan, bahwa formula campuran abu layang -400 mesh dan zeolit -70+80 mesh dengan perbandingan abu layang/zeolit sebesar 40/60 % berat dengan

permeabilitas $K = 5,00 \cdot 10^{-5}$ cm/detik dan koefisien dispersi efektif $D_e = 1,11 \cdot 10^{-5}$ cm²/detik dapat digunakan sebagai calon bahan urug pada penyimpanan limbah radioaktif.

DAFTAR PUSTAKA

1. Dixon, D.F., 1985, *A Program for Evolution from Storage to Disposal of Radioactive Waste at Chalk River Nuclear Laboratories*, Atomic Energy of Canada Limited, AECL-7083, Ontario, Canada.
2. Ziemkiewicz, P.F., and Skousen, J., 2000, *Use of Coal Combustion Products for Reclamation*, West Virginia University.
3. Chou, M.I.M, Patel, V., Su, W.J., and Stucki, J., 2000, *Brick Manufacture with Fly Ash from Illinois Coal*, Final Technical Report, Illinois States Geological Survey.
4. Rebeiz, K.S., Banko, A.S., and Craft, A.P., 1999, *Toxic and Radioactive Waste Management*, pp. 107 – 111.
5. Paul, N.C., 1992, *Coal ash Utilization*, In : *Encyclopedia of Environmental Control Technology*, Vol. 5, *Waste Minimization and Recycling* by Paul N. Cheremisoff, Gulf Publishing Co., Texas, pp. 236 - 243.
6. Cogburn, C.O., Hodgson, L.M., Ragland, R.C., 1986, *Disposal of Low Level Radioactive Waste Using High Calcium Fly Ash*, Technical Report, Arkansas University, Dept. of Mechanical Engineering, Fayetteville – USA.
7. 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.
8. 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.
9. Ven Te Chow, 1964, *Handbook of Applied Hydrology*, Mc Graw-Hill Book Company, New York, pp. 13-1, 13-15.
10. Champ, D.R., Molyaner, G.L., Young, J.L. and Lapcevic, P., 1985, *A Downhole Column Technique for Filed Measurement of Transport Parameter*, AECL-8905.
11. Poernomo, H., Sardjono, D., dan Budiyono, M.E., 2004, *Karakteristik Sorpsi dan Difusi ⁹⁰Sr dalam Abu Batubara sebagai Kandidat Bahan Urug pada Penyimpanan Limbah Radioaktif*, Prosiding Seminar Nasional Kimia XIV, UGM, Yogyakarta.
12. Guven, R.W., 1985, *Water Res. Res.* 21, 5.