

PENGOLAHAN LIMBAH URANIUM MENGUNAKAN ALUMINO SILIKO FOSFAT

Aisyah, Herlan Martono, Wati

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif
Badan Tenaga Nuklir Nasional
Email: aisyah@batan.go.id

ABSTRAK

Limbah uranium ditimbulkan dari kegiatan pemanfaatan teknologi nuklir dalam bidang produksi radioisotop, produksi bahan bakar nuklir, pengujian bahan bakar paska iradiasi dan dalam proses pemurnian uranium dari yellow cake. Uranium merupakan radionuklida berumur panjang dan berbahaya jika masuk kedalam tubuh manusia sehingga memerlukan pengolahan yang tepat dengan keselamatan yang tinggi. Pengolahan dilakukan dengan cara memisahkan uranium yang terkandung dalam limbah dengan proses pertukaran ion. Uranium yang telah terpisah kemudian diimobilisasi dengan polimer. Telah dilakukan penelitian pengolahan limbah uranium simulasi menggunakan Alumino Siliko Fosfat (ASP). Limbah uranium simulasi dengan konsentrasi 0,05 g/l dikontakkan dengan ASP dengan parameter waktu kontak dan pH. Alumino Siliko Fosfat jenuh uranium kemudian diimobilisasi dengan polimer resin epoksi dengan parameter jumlah kandungan limbah. Imobilisasi dilakukan dengan mencampur ASP jenuh uranium dengan resin epoksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi ASP terbaik diperoleh pada perbandingan 1:1, waktu kontak 15 menit dan pH 7, dengan penyerapan uranium sebesar 93,5 %. Karakteristik polimer-limbah hasil imobilisasi menunjukkan bahwa kandungan limbah yang optimal adalah 20 % berat dengan densitas 1,0538 g/cm³; kuat tekan 19,96 kN/cm² dan tidak terdeteksi adanya pelindihan uranium yang keluar dari polimer-limbah. Dengan demikian ASP dapat digunakan dalam pengolahan limbah uranium dan dapat dipertimbangkan untuk diaplikasikan di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif.

Kata kunci: Limbah uranium, zeolit, Alumino Siliko Fosfat, imobilisasi

ABSTRACT

PROCESSING OF URANIUM WASTE USING ALUMINA SILICA PHOSPHATE. Uranium waste generated from the utilization of nuclear technology on radioisotope production, nuclear fuel production, calibration of fuel post-irradiation, and the purification of uranium from yellow cake. Uranium is a long-lived radionuclides and hazardous if it was entered in human body, thus requiring appropriate treatment with high safety. The processing conducted by separated the uranium which was contained on waste with ions exchange process. Uranium has been separated, later then immobilized with the polymer. The study of simulation uranium waste processing using an Alumina Silica Phosphate (ASP) has been conducted. Simulation uranium waste with the concentration of 0,05 g/l was contacted to ASP with contact timer and pH as a parameters. The Alumina Silica Phosphate which saturated with uranium, later then immobilized with epoxy resin polymer by total of waste contents as a parameter. The immobilization was conducted by mixing ASP which saturated with uranium and epoxy resin. The study showed that the best composition of ASP was obtained at the ratio of 1:1, contact time of 15 minute, and pH of 7 with absorption of uranium about 93,5%. The characteristic of polymer and the immobilization waste showed that optimum of waste content is 20% of weight with the density of 1,0538 g/cm³; compressive strength of 19,96 kN/cm² and there was not detected the leaching of uranium which out from the polymer-waste. Therefore, ASP can be used on processing of uranium waste and could be suggested to be applied on Radioactive Waste Management Installation.

Keywords: uranium waste, zeolite, alumina silica phosphate, immobilization

PENDAHULUAN

Konsekuensi dari pemanfaatan teknologi nuklir dalam berbagai bidang yaitu timbulnya limbah radioaktif dimana limbah ini memerlukan pengelolaan yang baik agar aman bagi manusia dan lingkungan. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) adalah salah satu instansi pemerintah yang

memanfaatkan teknologi nuklir dalam berbagai bidang, diantaranya dalam bidang produksi radioisotop, produksi bahan bakar nuklir, pengujian bahan bakar paska iradiasi dan dalam proses pemurnian uranium dari yellow cake.

Dalam produksi radioisotop Mo⁹⁹, akan menimbulkan limbah radioaktif yang

mengandung uranium (U^{235} dan U^{238}), hasil belah dan radionuklida transuranium [1]. Limbah radioaktif yang ditimbulkan dari produksi bahan bakar nuklir merupakan limbah korosif yang mengandung uranium dan HF, sedangkan limbah radioaktif yang ditimbulkan dari laboratorium pengujian bahan bakar paska iradiasi mengandung uranium, hasil belah dan radionuklida transuranium. Pada proses pemurnian uranium dari *yellow cake* akan ditimbulkan limbah radioaktif (rafinat) yang banyak mengandung uranium [2,3]. Limbah yang mengandung uranium tersebut berbahaya bagi kesehatan jika masuk ke dalam tubuh dengan resiko kerusakan ginjal, kanker (hati, paru-paru, tulang, dan darah). Penghirupan uranium juga dapat meningkatkan resiko terkena kanker paru-paru. Hal ini telah banyak di buktikan bahwa radon beserta turunannya yang berasal dari U^{238} dapat menyebabkan penyakit kanker paru-paru jika konsentrasi gas radon beserta anak luruhnya cukup tinggi. Oleh karena itu, limbah yang mengandung uranium ini memerlukan pengolahan dengan tingkat keselamatan yang tinggi agar tidak menimbulkan dampak radiologis pada masyarakat dan lingkungan [4,5].

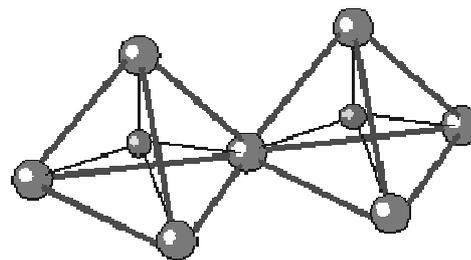
Limbah uranium yang ditimbulkan dari pemanfaatan teknologi nuklir di BATAN mempunyai konsentrasi uranium yang berbeda-beda tergantung dari jenis prosesnya. Untuk limbah yang mengandung kadar uranium yang cukup tinggi maka terlebih dahulu dilakukan pengambilan uranium yang terdapat dalam limbah sebelum limbah dikirim ke Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) untuk dilakukan pengelolaan.

Terdapat beberapa metode pengolahan limbah uranium, diantaranya adalah pengolahan secara kimia (koagulasi dan flokulasi), evaporasi, dan melalui proses pertukaran ion. Beberapa bahan yang dapat dipakai sebagai penukar ion dalam pengolahan limbah uranium diantaranya adalah resin, zeolit, maupun zeolit modifikasi.

Mineral alam zeolit merupakan senyawa alumino-silikat dengan struktur sangkar, banyak terdapat di Indonesia dan harganya murah. Mineral zeolit mempunyai struktur "framework" tiga dimensi dan menunjukkan sifat penukar ion, sorpsi, "molecular sieving" dan katalis sehingga memungkinkan digunakan dalam pengolahan limbah industri dan limbah nuklir [6].

Zeolit merupakan mineral yang terdiri dari kristal alumino silikat terhidrasi yang mengandung kation alkali atau alkali tanah dalam kerangka tiga dimensi. Ion-ion logam tersebut dapat diganti oleh kation lain tanpa merusak struktur zeolit dan menyerap air secara reversibel [6].

Zeolit biasanya ditulis dengan rumus kimia oksida atau berdasarkan satuan sel kristal $M_{2/n}O \cdot Al_2O_3 \cdot a SiO_2 \cdot b H_2O$ atau $M_{c/n} \{(AlO_2)_c(SiO_2)_d\} \cdot b H_2O$. Dimana n adalah valensi logam, a dan b adalah molekul silikat dan air, c dan d adalah jumlah tetrahedra alumina dan silika. Rasio d/c atau SiO_2/Al_2O_3 bervariasi dari 1-5. Zeolit tidak dapat diidentifikasi hanya berdasarkan analisis komposisi kimianya saja, melainkan harus dianalisis strukturnya. Kerangka dasar struktur zeolit terdiri dari unit-unit tetrahedral $(AlO_4)^{5-}$ dan $(SiO_4)^{4-}$ yang saling berhubungan melalui atom oksigen dan di dalam struktur tersebut Si^{+4} dapat diganti Al^{+3} dengan substitusi isomorfik [7]. Gambar 1 menunjukkan Tetrahedra alumina dan silika (TO_4) pada struktur zeolit.



Gambar 1. Tetrahedra alumina dan silika (TO_4) pada struktur zeolit [7]

Zeolit mempunyai kapasitas tukar kation (KTK) selektif tinggi yang membuatnya cocok untuk pemakaian beragam. Penggunaan zeolit yang didasarkan atas sifat KTK antara lain adalah pengolahan limbah nuklir, pengolahan limbah metalurgi, budidaya air dan lainnya. Jenis kation yang dapat dipertukarkan (*exchangeable cations*) yang terdapat di dalam zeolit perlu diketahui. Hal ini disebabkan jenis kation yang berbeda dalam mineral zeolit yang sama akan memberikan sifat fisika dan kimia yang berbeda dan yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap penggunaannya [7,8].

Zeolit alam dapat dimodifikasi menjadi penukar ion ganda bentuk alumino-siliko-fosfat (ASP) melalui reaksi pemanasan zeolit dengan amonium dihidrogen fosfat (ADHP).

Penukar ion ASP mempunyai kestabilan terhadap suhu yang cukup tinggi ($>600\text{ }^{\circ}\text{C}$) sehingga dapat digunakan secara langsung pada proses pemisahan pada suhu tinggi. Oleh karena itu, keunggulan ASP adalah disamping tetap mempunyai serapan terhadap logam berat dan radionuklida yang cukup tinggi seperti pada zeolit murni, bentuk ASP mempunyai kemampuan serapan terhadap anion^[8,9,10].

Pada umumnya Alumino Siliko Fosfat (ASP) digunakan untuk penukar anion. Oleh karena itu, dalam penelitian ini pada awalnya uranil nitrat ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)$) dikomplekskan dengan Na_2CO_3 sehingga akan membentuk kompleks uranil karbonat $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{-4}$ sehingga dapat diserap oleh ASP. Namun bentuk ion $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{-4}$ ini terlalu besar sehingga tidak masuk dalam range pori ASP^[7,11].

Disamping itu, ASP juga memiliki bagian yang positif (penukar kation) dan bagian yang negatif (penukar anion). Dalam percobaan pendahuluan diperoleh bahwa ternyata uranium yang diserap ASP kapasitasnya lebih besar dalam bentuk UO_2^{2+} daripada dalam bentuk $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{-4}$ sehingga dalam penelitian ini dilakukan penyerapan uranium dalam bentuk UO_2^{2+} .

Pemanfaatan ASP dalam pengolahan limbah uranium dilakukan dengan memanfaatkan proses pertukaran ion yang dimiliki oleh ASP. Dalam proses pertukaran ion ini uranium akan terikat dalam ASP hingga ASP mengalami kejenuhan. Alumino siliko fosfat yang telah jenuh uranium selanjutnya memerlukan imobilisasi dengan bahan matriks untuk mengungkung radionuklida uranium yang telah terikat didalamnya.

Uranium merupakan radionuklida pemancar alfa dengan waktu paro yang panjang, sehingga bahan matriks yang cocok untuk imobilisasi adalah polimer^[12,13]. Resin epoksi merupakan salah satu jenis polimer yang banyak digunakan sebagai material struktur. Material ini terbentuk dari reaksi antara epiklorohidrin dengan bifenil propana

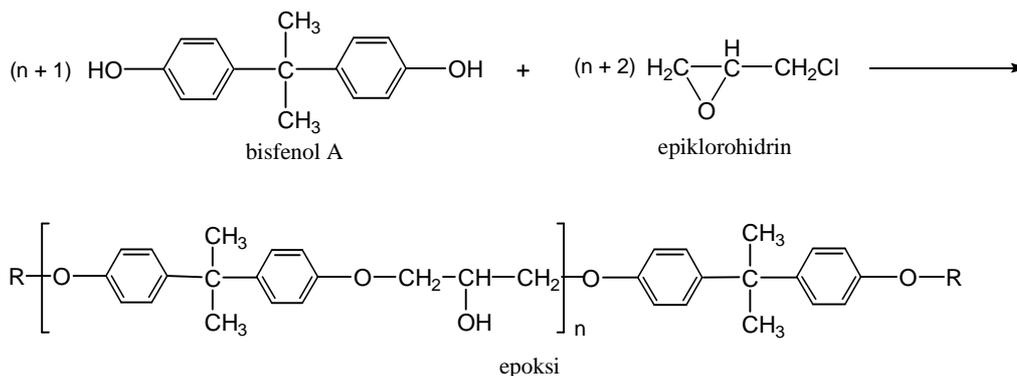
(bisfenol A), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2^[14,15].

Resin epoksi memiliki sifat yang unggul, diantaranya sifat mekanik yang baik, tahan terhadap bahan kimia, adesif dan mudah diproses. Berdasarkan pada keunggulan ini resin epoksi dipilih untuk imobilisasi limbah *trans uranium*. Terdapat beberapa jenis resin epoksi yang terdapat di pasaran dengan karakteristik yang berbeda-beda. Pada penelitian ini dipilih resin epoksi jenis EPOSIR 7120 yang biasa digunakan sebagai material standar dalam bahan struktur. Pertimbangan pemilihan EPOSIR 7120 ini karena harganya murah, selain itu mampu membentuk bahan keras dengan campuran air dalam jumlah terbatas.

Guna memenuhi standar keselamatan dan faktor ekonomi maka polimer-limbah (campuran resin epoksi, hardener, ASP jenuh uranium) hasil imobilisasi harus memiliki karakteristik tertentu, diantaranya densitas, kuat tekan dan laju pelindihan yang baik^[16].

Densitas perlu diperhatikan dalam proses imobilisasi karena densitas menjadi pertimbangan dalam perancangan sistem transportasi dan tempat penyimpanan sementara maupun tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif. Hasil imobilisasi limbah dengan densitas yang besar tentunya akan dapat menampung limbah lebih banyak sehingga dapat menghemat lahan tempat penyimpanan^[17].

Kuat tekan polimer-limbah hasil imobilisasi merupakan parameter penting untuk mengevaluasi efek bila bahan jatuh atau mengalami benturan. Untuk menjamin keselamatan penanganan, transportasi, penyimpanan sementara dan penyimpanan lestari limbah radioaktif, maka kuat tekan harus diperhitungkan dengan baik, sehingga apabila bahan terjatuh atau mengalami benturan tidak menimbulkan kerusakan yang serius, ataupun untuk mengukur seberapa jauh bahan mampu menahan beban tumpukan dalam tempat penyimpanan sementara maupun penyimpanan lestari^[17].



Gambar 2. Pembentukan epoksi oleh reaksi bisfenol A dan epiklorohidrin ^[14,15]

Laju pelindihan adalah besaran untuk menggambarkan kemampuan polimer-limbah hasil imobilisasi terhadap pelarutan air. Hal ini penting guna mencegah terlepasnya radionuklida yang telah terikat dalam matriks keluar ke lingkungan sebelum waktunya sehingga dapat menimbulkan dampak radiologis pada masyarakat ^[17].

Dalam penelitian ini, digunakan limbah simulasi yang mengandung uranium dengan konsentrasi 0,05 gram/liter. Penentuan konsentrasi uranium dilakukan dengan metode spektrofotometri UV-VIS dengan pengompleks arsenazo III. Percobaan penyerapan uranium oleh ASP dilakukan dengan mengkontakkan limbah uranium simulasi dengan ASP, dengan parameter waktu kontak dan pH. Kesempurnaan reaksi dalam proses penyerapan uranium oleh ASP akan dipengaruhi oleh lamanya waktu kontak dan pH proses. Untuk waktu kontak dan pH yang tepat akan terjadi reaksi yang sempurna, sehingga akan diperoleh penyerapan uranium yang optimal. Hal ini berarti secara ekonomi proses akan lebih efektif. Alumino Siliko Fosfat yang telah jenuh uranium diimobilisasi dengan polimer resin epoksi. Karakteristik polimer-limbah hasil imobilisasi akan dipengaruhi oleh kandungan limbah. Kandungan limbah yang semakin besar tentunya akan lebih ekonomis karena polimer-limbah dapat mengungkung limbah sebanyak-banyaknya. Namun demikian, kandungan limbah yang semakin besar dapat menurunkan kualitas polimer limbah hasil imobilisasi, yaitu radionuklida yang terkungkung dalam polimer-limbah akan lebih mudah terlindih keluar. Karakteristik polimer-limbah yang dipelajari adalah pengaruh kandungan limbah terhadap densitas, kuat tekan dan laju pelindihan. Penentuan densitas dilakukan dengan menimbang polimer-limbah dan menentukan volume berdasarkan diameter dan tingginya yang

berbentuk silinder, sedangkan kuat tekan ditentukan dengan alat uji tekan PAUL WEBER. Laju pelindihan ditentukan dengan metode uji pelindihan dipercepat menggunakan alat soklet dengan media pelindih air pada suhu 100 °C.

METODE PENELITIAN

Bahan

Dalam penelitian ini digunakan bahan : zeolit lampung (40-60 mesh), uranil nitrat heksahidrat $\{UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O\}$, metil iodida (CH_3I), NaCl jenuh, ammonium dihydrogen fosfat (ADHP), air bebas mineral, polimer (resin epoksi) EPOSIR 7120.

Metode

Pembuatan Zeolit Murni

Pembuatan zeolit murni dilakukan dengan merefluks zeolit alam dengan air bebas mineral selama 3 x 8 jam, hal ini untuk menghilangkan garam terlarut yang tercampur. Dilakukan penggantian air bebas mineral setiap 8 jam. Zeolit yang telah bersih dikeringkan dalam oven pada suhu 105 °C selama 3 jam. Untuk memisahkan zeolit dari partikel/mineral berat dilakukan dengan penambahan metil iodida (CH_3I), sehingga zeolit yang telah bebas dari mineral berat (seperti silikat) akan mengapung di bagian atas dalam cairan metil iodida. Zeolit dipisahkan dari mineral berat, sehingga diperoleh zeolit murni yang masih dalam bentuk multi kation ^[8].

Pembuatan Alumino Siliko Fosfat (ASP)

Alumino Siliko Fosfat (ASP) merupakan modifikasi zeolit yang dibuat dengan mencampur zeolit murni dengan ammonium

dihidrogen fosfat (ADHP) pada berbagai perbandingan berat 1:5, 1:1, dan 5:1. Campuran diaduk dan dipanaskan dalam oven pada suhu 235 °C selama 30 menit untuk proses peleburan. Campuran diaduk kembali dan dipanaskan kembali selama 4 jam. Campuran kemudian dituang ke dalam air mendidih dan disaring. Setelah penyaringan, dilakukan pencucian dengan air panas hingga bebas amonium. Pengeringan ASP dilakukan dalam oven pada suhu 80 °C dan ASP siap digunakan untuk proses penyerapan limbah uranium^[10].

Penentuan Komposisi ASP

Dalam penelitian ini digunakan limbah simulasi dengan konsentrasi 0,05 g/l, yang dibuat dengan cara melarutkan uril nitrat heksahidrat dalam air bebas mineral. Percobaan dilakukan dengan cara mencampur 250 ml larutan limbah simulasi dengan 0,25 gram ASP dengan berbagai komposisi yaitu ASP 1:5; 1:1 dan 5:1 dan 250 ml air. Campuran diputar (*rolling*) selama 2 jam, kemudian dilakukan analisis kadar uranium dalam beningan dengan metode spektrofotometri UV-VIS menggunakan pengompleks arsenazo III. Penyerapan uranium tertinggi merupakan komposisi ASP terbaik dan akan digunakan dalam percobaan selanjutnya .

Penyerapan Uranium Oleh ASP

Dalam penelitian ini parameter yang dipelajari adalah waktu kontak dan pH terhadap penyerapan uranium oleh ASP komposisi terbaik. Digunakan limbah simulasi dengan konsentrasi uranium 0,05 g/l.

Percobaan dengan parameter waktu kontak dilakukan dengan cara mencampur 250 ml larutan limbah simulasi dengan 0,25 gram ASP terbaik dan 250 ml air. Campuran di *rolling* dengan waktu kontak 4, 8, 12, 16, 20, dan 24 menit. Dari masing-masing sampel di analisis kadar uranium dalam beningannya dengan metode spektrofotometri UV-VIS menggunakan pengompleks arsenazo III. Penyerapan uranium yang optimal merupakan waktu kontak terbaik dan akan digunakan dalam percobaan selanjutnya.

Percobaan dengan parameter pH larutan limbah simulasi dilakukan dengan cara mencampur 250 ml larutan limbah simulasi dengan pH 3, 5, 7, 9, dan 11 dengan 0,25 gram ASP terbaik dan 250 ml air dalam botol. Campuran di *rolling* dengan waktu kontak

terbaik. Dari masing-masing sampel di analisis kadar uranium dalam beningannya dengan metode spektrofotometri UV-VIS menggunakan pengompleks arsenazo III. Penyerapan uranium yang optimal merupakan kondisi pH terbaik dan akan digunakan dalam percobaan selanjutnya.

Imobilisasi ASP Jenuh Uranium

Imobilisasi ASP jenuh uranium menggunakan polimer resin epoksi dilakukan dengan parameter kandungan limbah. Percobaan dilakukan dengan cara mencampur resin epoksi (rasio resin epoksi dan hardener 2:1) dengan ASP jenuh uranium dengan kandungan limbah 0, 10, 20, 30, 40, dan 50% berat. Campuran diaduk sampai homogen dan dicetak dalam cetakan silindris dengan diameter 25 mm dan tinggi 20 mm dan dibiarkan mengeras dengan waktu *curing* 8 – 12 jam. Polimer-limbah (campuran resin epoksi, hardener dan ASP jenuh uranium) yang telah mengeras selanjutnya dilakukan pengujian karakteristiknya.

Pengujian Karakteristik Polimer-Limbah Hasil Imobilisasi^[18,19]

Karakteristik polimer-limbah yang diuji adalah densitas, kuat tekan dan laju pelindihan. Densitas polimer-limbah ditentukan dengan menimbang dan mengukur volume berdasarkan diameter dan tinggi polimer-limbah yang berbentuk silinder dan kemudian dihitung dengan persamaan 1:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1) \quad \text{Dimana: } \rho: \text{ densitas (g/cm}^3\text{),}$$

m : massa polimer-limbah (g)
 v : volume polimer-limbah (cm³)

Kuat tekan polimer-limbah ditentukan menggunakan alat uji tekan Paul Weber dengan cara menekan polimer limbah yang berbentuk silindris sampai retak/pecah, kemudian dihitung dengan persamaan 2:

$$\sigma_c = \frac{P_{maks}}{A} \quad (2) \quad \text{Dimana: } \sigma_r = \text{kuat tekan}$$

(kN/cm²), P_{maks} = beban tekanan maksimum (kN) dan A = luas penampang (cm²).

Laju pelindihan dilakukan menurut *Japan Industrial Standard* (JIS) , yaitu laju pelindihan *dipercepat* dalam medium air. Polimer-limbah dalam bentuk silinder dengan diameter 25 mm dan tinggi 20 mm dimasukkan dalam basket dan dipasang pada

alat *soxhlet* untuk direfluks dengan air bebas mineral pada suhu 100°C selama 24 jam. Laju pelindihan dihitung berdasarkan persamaan 3:

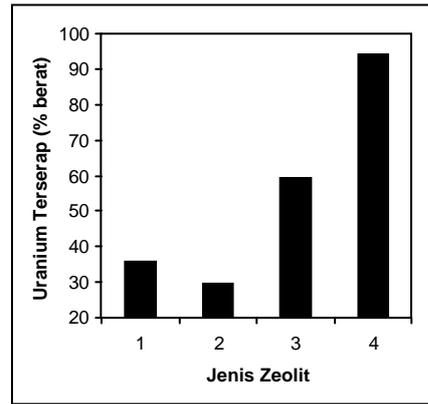
$$L = W/S.t \quad (3)$$

Dimana: L: laju pelindihan ($\text{g cm}^{-2} \text{ hari}^{-1}$), S: luas permukaan contoh (cm^2), W: berat uranium dalam polimer-limbah yang terlindih (g), t: waktu pelindihan (hari).

HASIL DAN PEMBAHASAN

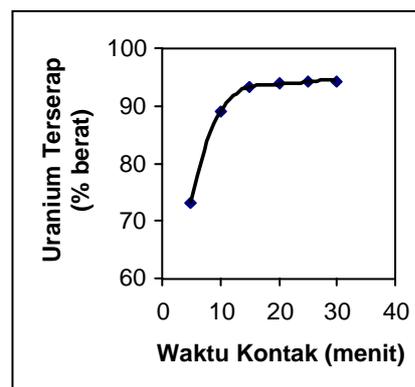
Hasil penelitian disajikan pada Gambar 3, 4, 5, 6 dan 7. Kemampuan penyerapan beberapa jenis ASP terhadap uranium disajikan pada Gambar 3.

Dari Gambar 3 tampak bahwa ASP memiliki kemampuan penyerapan uranium lebih tinggi bila dibandingkan dengan zeolit alam. Hal ini karena ASP telah mengalami proses penghilangan kotoran-kotoran yang terdapat pada zeolit alam. Adanya pengotor-pengotor pada zeolit alam akan mengganggu proses penyerapan. Pada komposisi ASP 1:5 penyerapannya lebih kecil dibandingkan dengan zeolit alam. Hal ini karena jumlah zeolit murni lebih sedikit dari ADHP, sehingga pertukaran ion yang terjadi kurang baik. Sebagian atom fosfat (P) menggantikan posisi Si tanpa merubah bentuk sangkar yang disebut *isomorfos replacement* (pergantian tetrahedral tanpa merusak struktur yang lain). Muatan atom P adalah negatif karena di paksa bertangan empat, sedangkan atom Al lebih stabil jadi tidak bisa digantikan oleh atom apapun. Pada Al inilah ion alkali dan alkali tanah menempel, dalam hal ini adalah Na^+ , karena penyusun zeolit jenis clinoptilolit adalah ion Na^+ . Kedudukan Na^+ inilah yang kemudian digantikan oleh UO_2^{+2} . Alumino siliko fosfat dengan komposisi 1:1 memiliki kemampuan serapan paling tinggi yaitu 94,2 % berat. Hal ini karena perbandingan zeolit murni dan ADHP telah seimbang. Oleh karena itu ASP 1:1 inilah yang dipakai pada percobaan selanjutnya, yaitu dengan parameter waktu kontak, pH dan percobaan imobilisasi.



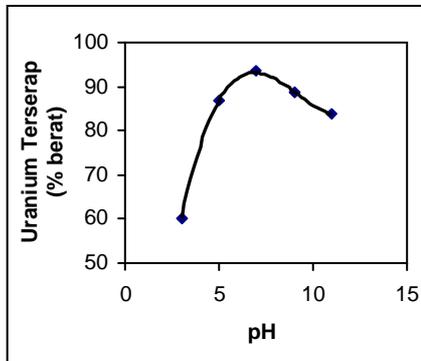
Gambar 3. Pengaruh komposisi ASP terhadap penyerapan uranium (1) zeolit alam; 2) ASP 1:5; 3) ASP 5:1; dan 4) ASP 1:1)

Gambar 4 menunjukkan pengaruh waktu kontak terhadap penyerapan uranium oleh ASP. Dari Gambar 4 tampak bahwa semakin bertambahnya waktu kontak maka jumlah uranium yang terserap oleh ASP (ASP 1:1) akan semakin meningkat. Setelah waktu kontak 15 menit, peningkatan penyerapan uranium tidak signifikan. Pada waktu kontak 15 menit penyerapan uranium sebesar 93,2% berat, sedangkan jika dilihat pada Gambar 3 bahwa untuk waktu kontak yang lebih lama yaitu 2 jam jumlah penyerapan uranium tidak jauh berbeda yaitu 94,2% berat. Dengan demikian untuk efisiensi proses pengolahan limbah uranium maka diambil waktu kontak 15 menit, dimana pada kondisi tersebut diperoleh penyerapan uranium yang optimal.



Gambar 4. Pengaruh waktu kontak terhadap penyerapan uranium oleh ASP

Gambar 5 menunjukkan pengaruh pH terhadap penyerapan uranium oleh ASP. Seperti diketahui bahwa karakteristik limbah radioaktif yang dihasilkan dari setiap fasilitas nuklir akan berbeda, sehingga dapat menghasilkan penyerapan uranium yang berbeda pula.



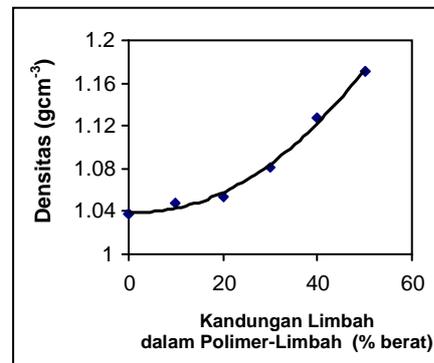
Gambar 5. Pengaruh pH limbah terhadap penyerapan uranium oleh ASP

Dari Gambar 5 tampak bahwa penyerapan uranium oleh ASP (ASP 1:1) meningkat dengan naiknya pH sampai dengan 7, sedangkan pada kenaikan pH lebih lanjut akan terjadi penurunan penyerapan uranium. Hal ini terjadi karena adanya perubahan spesiasi ion uranium dalam larutan. Diantaranya adanya kemungkinan terjadinya proses presipitasi/kopresipitasi, maupun adanya pembentukan spesi yang kurang kompetitif untuk terjadinya serapan. Untuk pH larutan yang terlalu asam akan menyebabkan terjadinya pelarutan uranium, sedangkan jika pH larutan terlalu basa maka akan terjadi pengendapan uranium. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa pH netral merupakan pH optimum ASP untuk menyerap uranium. Kondisi optimum diperoleh pada pH 7 dengan penyerapan uranium 93,5 % berat.

Berdasarkan parameter waktu kontak dan pH, maka diperoleh penyerapan uranium optimum dalam bentuk UO_2^{+2} oleh ASP 1:1 pada waktu kontak 15 menit dan pH 7 dengan uranium yang terserap 93.5 % berat.

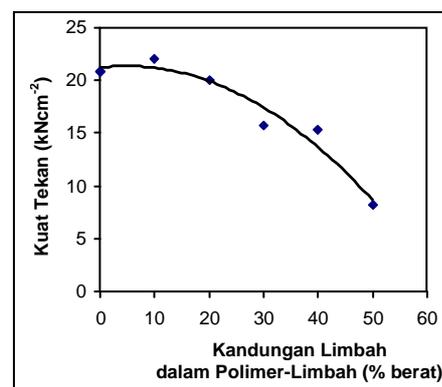
Pengaruh kandungan limbah dalam polimer-limbah terhadap densitas disajikan pada Gambar 6. Dari Gambar 6 tampak bahwa densitas meningkat dengan bertambahnya kandungan limbah dalam polimer-limbah, hal ini karena jumlah ASP (ASP 1:1) dalam polimer-limbah juga semakin besar. Alumino siliko fosfat mengandung atom-atom yang massanya lebih besar dibandingkan dengan

polimer, sehingga dengan bertambahnya kandungan limbah berarti bertambah pula atom-atom dengan massa yang lebih besar yang akan menaikkan nilai densitasnya.



Gambar 6. Pengaruh kandungan limbah dalam polimer-limbah terhadap densitas

Pengaruh kandungan limbah dalam polimer-limbah terhadap kuat tekan disajikan pada Gambar 7. Dari Gambar 7 tampak bahwa kuat tekan semakin menurun dengan naiknya kandungan limbah dalam polimer-limbah. Polimer resin epoksi merupakan polimer dengan struktur linier. Adanya prosentase kandungan limbah yang semakin besar menjadikan prosentase polimer semakin kecil. Ini berarti rantai polimer yang terbentuk semakin pendek, sehingga tidak cukup untuk mengungkung limbah. Hal ini mengakibatkan kuat tekannya semakin rendah. Kuat tekan yang optimal adalah 22,01 kN/cm² untuk kandungan limbah 10 % berat.



Gambar 7. Pengaruh kandungan limbah dalam polimer-limbah terhadap kuat tekan

Pada kandungan limbah 0 % (tanpa ASP) memiliki kuat tekan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan polimer limbah dengan kandungan limbah 10 % berat. Penambahan ASP kedalam polimer akan membentuk komposit yaitu suatu campuran material yang masih nampak sifat komponen penyusunnya. Komposit yang terdiri dari polimer dan ASP ini memiliki sifat yang saling menguatkan. Kandungan ASP pada kandungan limbah 10 % berat menjadi penguat pada polimer-limbah hasil imobilisasi, sehingga kuat tekannya lebih besar jika dibandingkan dengan polimer limbah dengan kandungan limbah 0 %. Kenaikan kandungan limbah lebih lanjut mengakibatkan kuat tekan menurun. Hal ini sejalan dengan menurunnya prosentase polimernya. Namun demikian untuk kandungan limbah 20 % berat memiliki kuat tekan yang masih cukup baik dan memenuhi persyaratan. Hal ini sejalan dengan pertimbangan ekonomi dalam pengolahan limbah radioaktif bahwa jika kandungan limbah 10 % berat maka proses pengolahan limbah menjadi tidak ekonomis.

Uji pelindungan terhadap polimer-limbah hasil imobilisasi menunjukkan hasil yang tidak signifikan terhadap adanya pelindungan uranium keluar dari polimer-limbah hasil imobilisasi. Hal ini terjadi karena uranium telah diikat oleh 2 material yaitu ASP dan polimer sehingga uranium telah terkungkung cukup kuat dalam polimer- limbah.

Berdasarkan pertimbangan faktor keselamatan lingkungan (laju pelindungan), densitas, kuat tekan dan faktor ekonomi maka polimer-limbah hasil imobilisasi yang optimal diperoleh pada kandungan 20 % berat dengan densitas $1,0538 \text{ g/cm}^3$, kuat tekan $19,96 \text{ kN/cm}^2$ dan tidak terdeteksi adanya uranium yang terlindih.

KESIMPULAN

Pengolahan limbah uranium dilakukan menggunakan ASP. Penyerapan uranium oleh ASP lebih besar dalam bentuk UO_2^{2+} dari pada dalam bentuk $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{-4}$, sehingga dalam penelitian ini dilakukan penyerapan uranium dalam bentuk UO_2^{2+} . Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi ASP terbaik diperoleh pada perbandingan 1:1, waktu kontak 15 menit dan pH 7 dengan penyerapan uranium sebesar 93,5 % berat. Karakteristik polimer-limbah hasil imobilisasi menunjukkan bahwa kandungan limbah dalam polimer-limbah yang optimal adalah 20 % berat dengan

densitas $1,0538 \text{ g/cm}^3$, kuat tekan $19,96 \text{ kN/cm}^2$ dan tidak terdeteksi adanya pelindungan uranium keluar dari polimer-limbah. Dengan demikian ASP dapat digunakan dalam pengolahan limbah uranium dan dapat dipertimbangkan untuk diaplikasikan di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR).

DAFTAR PUSTAKA

1. De Villiers, W. Van Zyl., 1995, The Production of Fission ^{99}Mo and Management of The Resultant Waste, IAEA- RTC on Management of Low Level Radioactive Waste from Hospital and Other Nuclear Applications, Pretoria, South Africa, 27 June-13 July.
2. Basabilvazo, S. Countiss, et.all., 2002, Technological Enhancements for Optimizing The TRU Waste Management System, Waste Management '02 Conference, Tucson,.
3. International Atomic Energy Agency, 1999, Minimization of Waste from Uranium Purification, enrichment and Fuel Fabrication, IAEA- TECDOC -1115, Vienna.
4. International Atomic Energy Agency, 2001, Handling and Processing of Radioactive Waste From Nuclear Applications, Technical Series Report No. 402 A, IAEA, Vienna.
5. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, 2006, Laporan analisis Keselamatan Rev.5, PTLR, Serpong.
6. Bell, R. G., 2001, What are zeolites? URL: <http://www.bza.org/zeolites.html>
7. Las. T, 1995, Zeolite for Radioactive Waste Treatment, Techical Report, IAEA-RC No 7215/R2/RB, China.
8. Las, T. Dan Gunandjar, 1999, Pemanfaatan Mineral Alam Zeolit Untuk Mendukung Pelestarian Lingkungan, Prosiding Seminar Teknologi Pengolahan Limbah II, 195-202, BATAN, Serpong.
9. Sherman, J, D, 1999, Synthetic Zeolites and Other Microporous Oxide Molecular Sieves, Colloquium Paper Proc. Natl. Acad. Sci. Vol. 96, p. 3471-3478,
10. Pratomo, B.S., dkk., 1997, Alumino-Siliko-Fosfat (ASP) Sebagai Modifikasi Zeolit", Buletin LIMBAH, Volume 2 No.2, hal.13-20, Serpong.

11. Arnelli, dkk., 1999, Kegunaan Zeolit Termodifikasi Sebagai Penyerap Anion. Laporan Penelitian UNDIP, Semarang.
12. K. Sakr, et.all., 2003, Immobilization of Radioactive Waste in Mixture of Cement, Clay and Polymer, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, vol.256 No.2, Cairo.
13. E. W. Holtzcheiter, John R. Harbow, 1998, Immobilization and Waste Form Product Acceptance for Low Level and TRU Waste Forms, Proceeding of International Conference on Decommissioning and Decontamination on Nuclear, Colorado.
14. James E. Mark, 2006, Physical Properties of Polymers Handbook, 2nd ed, New York.
15. Joel R. Fried, 1995, "Polymer Science and Technology". Prentice-Hall Inc. USA,
16. International Atomic Energy Agency, 1997, Characterization of Radioactive Waste Form and Packages, Technical Report Series No. 383, laea,Vienna.
17. International Atomic Energy Agency,2007, Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization, IAEA- TECDOC -1537, Vienna.
18. Dan Camphell, Richard A. Petrick, Jun R. White, 2000, Polymer Characterization: Physical Techniques, 2nd ed., Oxford University Press, New York.
19. Asm, Handbook, 1992, vol. 10 : Materials Characterization, 9th ed, ASM, USA.