

IMOBILISASI LIMBAH CAIR TRANSURANIUM SIMULASI DARI INSTALASI RADIOMETALURGI DENGAN POLIMER POLIESTER TAK JENUH

WATI

PTLR-BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang 15310

Abstrak

IMOBILISASI LIMBAH CAIR TRANSURANIUM SIMULASI DARI INSTALASI RADIOMETALURGI DENGAN POLIMER POLIESTER TAK JENUH. Polimer poliester tak jenuh digunakan untuk imobilisasi limbah cair transuranium (LCTRU) simulasi dari Instalasi Radiometalurgi (IRM) karena polimer mempunyai ketahanan kimia yang tinggi dan tahan dalam jangka lama. Proses polimerisasi dilakukan dengan mencampur poliester tak jenuh (unsaturated polyester) Yukalac2252 dan methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO) sebanyak 1 % (b/b) dari poliester sebagai katalis, kemudian ditambah LCTRU simulasi yang telah diserap resin penukar ion. Konsentrasi limbah dalam polimer dibuat bervariasi 0, 10, 20, 30, 40 dan 50 % (b/b). Proses polimerisasi secara eksotermis dengan waktu curing 24 jam terjadi dalam tabung gelas berdiameter 1,30 cm dan panjangnya 12,50 cm. Hasil imobilisasi diuji kekuatan tekannya dengan kompaktor Paul Weber dan laju pelindihannya dengan alat soxhlet pada 100 °C, 1 atm selama 6 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa makin tinggi kandungan limbah dalam poliester tak jenuh, makin tinggi pula densitas, kuat tekan dan laju pelindihan polimer hasil imobilisasi. Poliester tak jenuh dengan kandungan LCTRU simulasi 20 % (b/b), densitas 0,99 g/cm³, kuat tekan 14,28 kN/cm² dan laju pelindihan 8,99 x 10⁻² g/cm²hari sebagai hasil terbaik.

Kata kunci : imobilisasi, limbah cair transuranium, poliester tak jenuh

Abstract

IMMOBILIZATION OF SIMULATED TRANSURANIC LIQUID WASTE FROM RADIOMETALLURGY INSTALLATION USING UNSATURATED POLYESTER POLYMER. Unsaturated polyester polymer was used for immobilization of simulated transuranic (TRU) liquid waste from Instalation of Radiometallurgy (IRM). The polymerization process was conducted with a mixture unsaturated polyester (Yukalac2252) and 1 % (w/w) methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO) of polyester in amount as catalyst and then added spent ion exchange contain TRU waste. The waste concentration in the polymer were made various are 0, 10, 20, 30,40 and 50 % (w/w). The exothermic polymerization process with the curing time 24 hours occurred in the glass tube has 1,30 cm in diameter and 12,50 cm in length. These immobilization products were tested it's compressive strength by Paul Weber Compactor and it's leaching rate by soxhlet apparatus at 100 °C, 1 atm for 6 hours. The results show that the higher of waste loading in the unsaturated polyester polymers, the higher of density, compressive strength and leaching rate. Unsaturated polyester polymer contain 20 % (w/w) transuranic waste simulation has density 0,99 g/cm³, compressive strength 14,28 kN/cm² and leaching rate 8,99 x 10⁻² g/cm².day is the best product.

Keywords : immobilization, transuranic(TRU) liquid waste, unsaturated polyester

PENDAHULUAN

Limbah Cair Aktivitas Tinggi (LCAT) umumnya ditimbulkan dari ekstraksi siklus I

proses olah ulang bahan bakar bekas reaktor nuklir, sedangkan Limbah Cair Transuranium (LCTRU) ditimbulkan dari ekstraksi siklus II proses tersebut [1]. Proses olah ulang bertujuan

untuk mengambil sisa uranium yang tidak terbakar dan plutonium yang terjadi dalam bahan bakar bekas reaktor nuklir. Komponen utama LCAT adalah radionuklida hasil belah (*fission product*) yang terkontaminasi aktinida. Limbah Cair Transuranium pada umumnya berupa pelarut bekas proses olah ulang bahan bakar bekas, yang banyak mengandung aktinida dan sedikit hasil belah.

Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif di PTLR dirancang untuk mengolah limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang dari reaktor *G.A. Siwabessy* beserta instalasi penunjangnya. Pada perkembangan lebih lanjut timbul limbah aktivitas tinggi dan transuranium dari produksi radioisotop di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) dan pengujian bahan bakar pasca iradiasi di Instalasi Radiometalurgi (IRM). Sesuai dengan azas keselamatan yang dianut oleh teknologi nuklir maka limbah radioaktif ini harus dikelola dengan baik untuk melindungi lingkungan dan masyarakat dari potensi dampak radiologi yang dapat ditimbulkan.

Instalasi Radiometalurgi melakukan pengujian terhadap bahan bakar dengan pengkayaan U^{235} 20 % yang telah diiradiasi dalam reaktor. Bahan bakar teriradiasi ini kemudian dilarutkan dalam HNO_3 6-8 N. Karena berasal dari iradiasi bahan bakar yang diperkaya 20 %, secara teoritis kandungan hasil belah dan aktinidanya dalam kelongsong banyak. Agar komposisi sesuai dengan definisi LCAT proses olah ulang bahan bakar bekas, maka dilakukan pengolahan awal yaitu ekstraksi dengan pelarut tri butil fosfat (TBP) + dodekan untuk memisahkan hasil belah dengan aktinida. Hasil ekstraksi adalah larutan yang banyak mengandung hasil belah dan LCTRU yang banyak mengandung aktinida, sesuai dengan definisi LCAT dan LCTRU proses olah ulang bahan bakar bekas. Selanjutnya LCAT diolah dengan proses vitrifikasi dan LCTRU dengan polimer.

Data aktivitas total limbah cair IRM, yaitu 122,608 Bq/ml dengan radionuklida dominan Cs^{137} seperti yang disajikan dalam Tabel 1 [2]. Berdasarkan data tersebut, maka dipelajari aktivitas limbah cair sebagai fungsi waktu untuk menentukan bahan matriks yang digunakan dalam proses imobilisasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa limbah cair dari IRM selain Cs^{137} juga mengandung aktinida

berumur paro panjang [3]. Pengelolaan limbah tersebut perlu waktu lebih dari 300 tahun. Semen yang mengalami degradasi setelah 300 tahun tidak dapat digunakan untuk imobilisasi limbah cair yang berumur panjang. Bahan gelas terlalu mahal prosesnya untuk imobilisasi limbah IRM yang aktivitasnya tidak setinggi aktivitas LCAT dari proses olah ulang yang perlu waktu pengelolaan jutaan tahun. Sesuai dengan standar *International Atomic Energy Agency* (IAEA) proses imobilisasi limbah TRU dilakukan dengan polimer [4].

Tabel 1. Unsur radionuklida dalam limbah cair dari IRM [2]

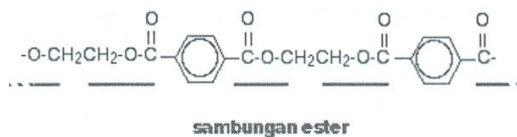
No.	Radionuklida	Aktivitas Jenis (Bq/ml)
1.	Cd^{109}	1,800
2.	Ce^{144}	1,200
3.	Ru^{106}	0,300
4.	Cs^{134}	2,600
5.	Cs^{137}	116,000
6.	Co^{60}	0,600
7.	Co^{57}	-
8.	Np^{237}	-
9.	Ba^{131}	0,066
10.	Ra^{226}	0,042
11.	Eu^{154}	-
12.	Br^{82}	-
Aktivitas Total		122,608

Polimer merupakan bahan yang cocok untuk imobilisasi limbah TRU karena mempunyai umur panjang dan sifat kimia (laju pelindihan) yang baik, sedangkan sifat fisiknya (titik lelehnya sekitar 400 °C) cukup memadai serta tahan dalam jangka lama. Ada beberapa jenis polimer yang telah dipelajari sebagai bahan matriks untuk imobilisasi limbah TRU seperti : poliester stiren, epoksi akrilat, stiren divinil benzena dan epoksi [5].

Penelitian ini dilakukan untuk mendapatkan alternatif jenis polimer sebagai bahan imobilisasi LCTRU yang dibuat secara reaksi eksotermis. Dari segi prosesnya dipilih polimer poliester tak jenuh (*unsaturated polyester*) karena merupakan salah satu polimer yang reaksinya eksotermis sehingga proses lebih sederhana. Poliester tak jenuh dalam kebanyakan hal ini disebut poliester saja. Resin cair dengan viskositas yang relatif rendah, mengeras pada suhu kamar dengan penggunaan

katalis dan tanpa menghasilkan gas sewaktu pengesetan maka tak perlu diberi tekanan untuk pencetakan.

Poliester adalah suatu kategori polimer yang mengandung gugus fungsional ester dalam rantai utamanya (Gambar 1). Meski terdapat banyak sekali poliester, istilah "poliester" merupakan bahan yang spesifik lebih sering merujuk pada polietilena tereftalat (PET) [6,7].



Gambar 1. Poliester [6,7].

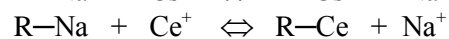
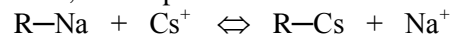
Poliester dibuat dengan sebuah reaksi yang melibatkan sebuah asam dengan dua gugus $-COOH$, dan sebuah alkohol dengan dua gugus $-OH$. Suatu asam dibasa (etilen glikol, propilen glikol, 1,3-butilen glikol, dietilen glikol, bisfenol dioksietil eter) bereaksi secara kondensasi dengan alkohol dihidrat (asam tak jenuh : anhidrida maleat, asam fumarat, atau asam jenuh : asam adipat, anhidrid ftalat, asam isoftalat, anhidrid tetrakloroftalat) akan menghasilkan poliester, karena asam tak jenuh digunakan dengan berbagai cara sebagai bagian dari asam dibasa, yang menyebabkan terdapatnya ikatan tak jenuh dalam rantai utama polimer yang dihasilkan. Senyawa yang dihasilkan disebut poliester tak jenuh.

Poliester tak jenuh termasuk jenis resin termoset. Resin termoset mempunyai struktur tiga dimensi. Polimer tiga dimensi adalah polimer yang dapat membentuk struktur jaringan bila monomer yang bereaksi bersifat fungsional ganda, artinya mereka dapat menghubungkan tiga atau lebih molekul yang berdekatan [8]. Bila dalam proses polimerisasi tersebut ditambahkan pula limbah radioaktif, maka konstituen limbah akan terkungkung dalam struktur kerangka tiga dimensi polimer tersebut sebagai *filler*.

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh komposisi polimer-limbah yang optimal, sehingga diperoleh karakteristik blok polimer-limbah yang baik. Karakteristik blok polimer-limbah yang dipelajari adalah densitas, kuat tekan dan laju pelindihan sebagai fungsi kandungan limbah (*waste loading*). Pembuatan limbah cair simulasi dilakukan dengan melarutkan Cs_2CO_3 dan CeO_2 ke dalam air

bebas mineral dengan perbandingan sesuai data komposisi limbah radioaktif cair dari IRM (Tabel 1.) [2]. Dari data tersebut radionuklida yang dominan adalah Cs^{137} , sedang unsur yang lain diganti dengan cerium (Ce).

Hasil imobilisasi LCTRU dipengaruhi oleh kandungan limbah atau *waste loading* (WL). Resin penukar ion digunakan untuk partisi atau pengolah awal limbah transurium dari IRM. Resin penukar ion tidak menyerap air, tetapi berfungsi untuk mengikat ion cesium dan cerium, sesuai persamaan reaksi :



dengan R adalah gugus fungsional dari resin penukar ion. Resin penukar ion jenis *amberlite* mempunyai kerangka polimer polistirena-divinil benzena, dengan gugus fungsional $-SO_3HNa$ atau $-SO_3Na$ atau $-CH_2SO_3Na$ untuk kation, dan gugus amina primer, sekunder atau tersier untuk anion. Dalam penelitian ini limbah cair transurium diserap menggunakan resin penukar ion sampai resin menjadi jenuh, kemudian imobilisasi dilakukan menggunakan polimer poliester tak jenuh.

Blok polimer-limbah yang terbentuk diukur densitasnya, kemudian dilakukan pengujian terhadap kuat tekan dan laju pelindihan. Densitas merupakan salah satu parameter blok polimer limbah yang dibutuhkan untuk memprediksi keselamatan transportasi, penyimpanan sementara (*interm storage*), dan penyimpanan lestari. Densitas dari blok polimer-limbah ditentukan dengan persamaan :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

dengan ρ = densitas (g/cm^3), m = massa sampel (g), V = volume sampel (cm^3).

Kuat tekan adalah gaya maksimum untuk menghancurkan benda uji dibagi luas permukaan yang mendapat tekanan. Kuat tekan blok polimer limbah merupakan parameter penting untuk evaluasi karena jatuh atau mengalami benturan. Kuat tekan bahan dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\sigma_c = \frac{P_{maks}}{A} \quad (2)$$

dengan σ_c = kuat tekan (kN/cm^2), P_{maks} = beban tekanan maksimum (kN), A = luas

penampang (cm^2). Faktor yang mempengaruhi kuat tekan adalah komposisi dan homogenitas.

Laju pelindihan adalah salah satu karakteristik blok polimer limbah yang penting untuk evaluasi hasil imobilisasi, karena tujuan akhir imobilisasi limbah memperkecil potensi terlepasnya radionuklida yang ada dalam limbah itu ke lingkungan. Laju pelindihan dalam hal ini diasumsikan sebagai korosi, yaitu lepasnya unsur kerangka polimer ditambah laju pelindahannya sendiri, yaitu lepasnya sejumlah unsur limbah dari blok polimer limbah. Laju pelindihan dipercepat digunakan pada penelitian jangka pendek untuk mengetahui pengaruh beberapa parameter dan mengevaluasi kualitas hasil imobilisasi. Pengujian menggunakan alat Soxhlet pada suhu 100°C dan tekanan 1 atm selama 6 jam. Dalam penelitian laju pelindihan ditentukan menurut *Japan Industrial Standard (JIS)* yaitu dengan mengukur kehilangan berat sampel [9,10]. Laju pelindihan dinyatakan dengan persamaan :

$$L = \frac{W_0 - W_t}{A \cdot t} \quad (3)$$

dengan L = laju pelindihan ($\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{hari}^{-1}$), W_0 = berat sampel mula-mula (g), W_t = berat sampel setelah dilindih selama t jam (g), A = luas permukaan (cm^2), dan t = waktu pelindihan (hari).

METODE PENELITIAN

Bahan

Resin penukar ion jenis *Amberlite IR 120 Na* dari *Rohm and Haas France S.A.S*, poliester tak jenuh (*Yukalac 2252*), katalis *methyl ethyl ketone peroxide* (MEKPO), CsCl buatan Univar, CeO_2 buatan Sigma Chemical Co. dan air bebas mineral.

Alat

Alat-alat yang digunakan meliputi : neraca analitik, labu ukur, gelas beker, pengaduk, gelas arloji, oven, cetakan polimer yang berbentuk tabung gelas reaksi dengan diameter 1,30 cm dan panjang 12,50 cm,

gergaji, jangka sorong, alat uji tekan Paul Weber dan Soxhlet untuk uji lindih.

Metode

Pembuatan limbah cair transuranium simulasi

Limbah cair transuranium simulasi dibuat berdasarkan data komposisi limbah radioaktif cair dari IRM (Tabel 1.) [2]. Dari data tersebut radionuklida yang dominan adalah Cs^{137} , sedang unsur yang lain diganti dengan cerium (Ce). Perbandingan aktivitas masing-masing unsur dari komposisi limbah radioaktif cair tersebut diubah ke dalam perbandingan berat menggunakan persamaan disintegrasi (peluruhan zat radioaktif). Limbah cair transuranium simulasi dibuat dengan melarutkan CsCl dan CeO_2 dengan perbandingan berat Cs : Ce adalah 1: 1.246,5 ke dalam 1 liter air bebas mineral.

Pengolahan awal/partisi limbah cair transuranium simulasi dengan resin penukar ion

Limbah cair transuranium simulasi yang terbentuk selanjutnya diserap menggunakan resin penukar ion jenis *Amberlite IR 120 Na* dari *Rohm and Haas France S.A.S* ukuran butir 40 mesh sampai resin menjadi jenuh (± 1 hari) sambil diaduk menggunakan *magnetic stirrer*. Setelah resin jenuh kemudian dikeringkan pada suhu 100°C menggunakan oven untuk menguapkan kadar airnya sampai resin benar-benar kering. Resin penukar ion yang telah jenuh dengan campuran Cs + Ce ini selanjutnya disebut sebagai "resin bekas/limbah" yang akan digunakan untuk penelitian. Selanjutnya resin bekas diimobilisasi menggunakan polimer poliester tak jenuh. Resin *Amberlite IR 120 Na* dari *Rohm and Haas France S.A.S* yang digunakan dalam penelitian ini memiliki kapasitas tukar kation 1,50 meq/gram. Berdasarkan nilai kapasitas tukar kation ini kemudian dihitung kandungan campuran Cs + Ce yang ada dalam resin bekas tersebut. Banyaknya resin yang digunakan dan kandungan campuran unsur Cs + Ce yang ada dalam resin bekas ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan campuran unsur Cs + Ce dalam resin bekas berdasarkan berat resin yang digunakan, dengan nilai kapasitas tukar kation 1,5 meq/gram dalam kondisi jenuh

Waste Loading (%)	Berat Resin (gram)	Kandungan Unsur Dalam Resin Bekas (gram)			
		Cs	Cs ₂ CO ₃	Ce	CeO ₂
0	0	-	-	-	-
10	5	0,8 x 10 ⁻³	0,00098	0,9974	1,2253
20	10	1,6 x 10 ⁻³	0,00196	1,9947	2,4506
30	15	2,4 x 10 ⁻³	0,00294	2,9921	3,6759
40	20	3,2 x 10 ⁻³	0,00392	3,9894	4,9000
50	25	4 x 10 ⁻³	0,0049	4,9868	6,1257

Pembuatan Blok Polimer-Limbah

Polimer yang digunakan sebagai pengungku adalah poliester tak jenuh (*unsaturated polyester*) *Yukalac 2252* yang dicampur dengan katalis MEKPO (bersifat asam kuat). Jumlah fraksi volume katalis ditentukan sebesar 1 % (b/b) dari poliester. Kandungan limbah (resin yang telah jenuh campuran Cs + Ce) ditentukan sebesar 0, 10, 20, 30, 40, dan 50 % (b/b). Perbandingan komposisi limbah-polimer ditunjukkan pada Tabel 3. Campuran resin, poliester, dan katalis sesuai perbandingan tersebut di atas diaduk hingga homogen kemudian dicetak dalam tabung gelas reaksi dengan diameter 1,30 cm dan panjang 12,50 cm. Setelah terbentuk polimer padat, polimer dikeluarkan dari tabung reaksi dan dipotong-potong dengan panjang 1,30 cm. Masing-masing sampel selanjutnya dilakukan uji kualitas meliputi uji densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan.

Uji Kualitas Blok Polimer-Limbah

Pengukuran densitas dilakukan dengan cara mengukur tinggi dan diameter sampel dengan jangka sorong serta menimbang blok polimer-limbah yang telah berulang-ulang dikeringkan dalam oven dan didinginkan dalam desikator hingga diperoleh berat konstan. Densitas sampel dihitung berdasarkan persamaan (1). Pengujian kekuatan tekan dilakukan dengan kompaktor buatan *Paul Weber* jenis D.7064 *Remshaiden-Grunbach*. Sampel polimer-limbah yang berbentuk silinder dilakukan penekanan sampai pecah. Kuat tekan polimer-limbah dihitung berdasarkan persamaan (2). Penentuan laju pelindihan dilakukan dengan alat soxhlet pada 100 °C, 1 atm selama 6 jam dengan laju alir 300 ml/jam.

Beda berat sampel sebelum dan sesudah pelindihan merupakan kehilangan berat selama uji pelindihan. Sebelum ditimbang contoh dipanaskan dalam oven pada 110 °C kemudian didinginkan dalam desikator dan selanjutnya sampel ditimbang sampai diperoleh berat tetap. Laju pelindihan dihitung berdasarkan persamaan (3). Rasio optimum blok polimer-limbah hasil imobilisasi didapatkan dari hasil penentuan densitas, kuat tekan dan laju pelindihan.

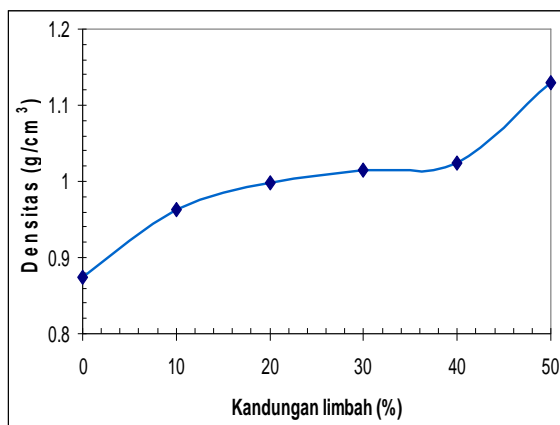
Tabel 3. Komposisi limbah-polimer untuk masing-masing kandungan limbah dengan berat total 50 g

Kandungan limbah (% berat)	Resin Bekas (gram)	Poliester tak jenuh (gram)	Katalis MEKPO (gram)
0	0	50	0,5
10	5	45	0,45
20	10	40	0,40
30	15	35	0,35
40	20	30	0,30
50	25	25	0,25

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengamatan secara visual hasil imobilisasi limbah dengan poliester tak jenuh menunjukkan bahwa poliester tak jenuh yang tidak mengandung limbah transuranium tidak berwarna (bening) dan tembus cahaya, sedangkan yang mengandung limbah TRU berwarna kuning, makin tinggi kandungan limbah warna polimer makin kuning. Hal ini dapat terjadi karena semakin tinggi kandungan limbah akan diikuti dengan semakin banyaknya resin penukar ion maupun kandungan Cs + Ce yang ada dalam blok polimer-limbah tersebut seperti ditunjukkan pada Tabel 2 dan 3.

Pengaruh kandungan limbah terhadap densitas polimer poliester tak jenuh disajikan pada Gambar 2. Gambar 2 menunjukkan bahwa makin besar kandungan limbah, makin besar pula densitas polimer poliester tak jenuh yang dihasilkan. Hal ini disebabkan oleh kenaikan kandungan limbah akan diikuti dengan penurunan jumlah/volume polimer yang digunakan untuk mengungkung limbah seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3, serta diikuti dengan kenaikan kandungan unsur Cs + Ce seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Poliester tak jenuh disusun oleh atom-atom C dan H yang massanya jauh lebih kecil dibandingkan dengan limbah transurium (Cs + Ce). Semakin tinggi kandungan limbah maka makin banyak atom-atom berat (Cs + Ce) yang terkandung dalam polimer poliester tak jenuh tersebut, sehingga densitasnya akan semakin besar.

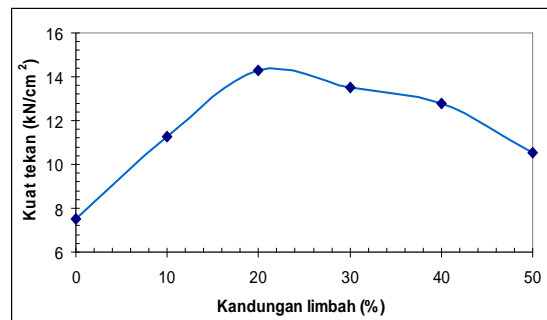


Gambar 2. Pengaruh kandungan limbah terhadap densitas polimer poliester tak jenuh

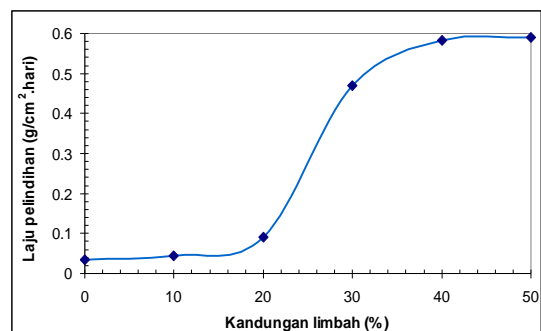
Pengaruh kandungan limbah terhadap kuat tekan polimer poliester tak jenuh dapat dilihat pada Gambar 3. Gambar 3 menunjukkan bahwa harga kuat tekan naik dengan kenaikan kandungan limbah sampai nilai optimumnya yaitu sebesar 14,29 kN/cm² pada kandungan limbah TRU 20 % (b/b). Hal tersebut disebabkan oleh unsur-unsur limbah mengisi rongga antara ikatan-ikatan dalam struktur kerangka tiga dimensi polimer sebagai *filler* [8]. Sedangkan pada kandungan limbah di atas 20 % (b/b) rongga yang terbentuk tidak cukup mengungkung limbah yang ada, sehingga kekuatan tekannya semakin menurun. Kekuatan

tekan polimer polistiren adalah 16.000 lb.in⁻² (=11,05 kN/cm²), poliester stiren 30.900 lb.in⁻² (= 20,71 kN/cm²) dan epoksi 25.000 lb.in⁻² (=17,26 kN/cm²) [11,12]. Kekuatan tekan poliester tak jenuh (14,29 kN/cm²) lebih besar dibandingkan kekuatan tekan polistiren, karena adanya ikatan silang pada poliester tak jenuh.

Pengaruh kandungan limbah terhadap laju pelindihan polimer poliester tak jenuh disajikan pada Gambar 4. Makin besar kandungan limbah semakin besar pula laju pelindihannya. Hal ini disebabkan oleh konsentrasi radionuklida dalam polimer semakin besar sehingga perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong (*driving force*) proses difusi menjadi lebih besar.



Gambar 3. Pengaruh kandungan limbah terhadap kekuatan tekan polimer poliester tak jenuh



Gambar 4. Pengaruh kandungan limbah terhadap laju pelindihan polimer poliester tak jenuh

Dalam suatu proses pengolahan limbah ada beberapa hal yang menjadi pertimbangan yaitu hasil pengolahan yang memenuhi persyaratan, proses sederhana sehingga dapat diterapkan di Instalasi Pengolahan Limbah (IPLR) PTLR-BATAN dan ekonomis. Kandungan limbah yang besar akan lebih

ekonomis, namun karakteristik blok polimer-limbah yang dihasilkan cenderung menurun. Demikian pula sebaiknya karakteristik blok polimer-limbah yang baik dapat diperoleh pada proses dengan kandungan limbah yang lebih rendah. Tujuan utama pengolahan limbah radioaktif adalah mengungkung radionuklida dalam bahan matriks tertentu sehingga meminimalkan potensi pelepasan radionuklida ke lingkungan. Blok polimer-limbah dengan kandungan limbah lebih besar dari 20 % (b/b) berat terjadi kenaikan laju pelindihan radionuklida Cs + Ce yang cukup besar sehingga mempunyai potensi pelepasan radionuklida ke lingkungan yang lebih besar, seperti disajikan dalam Gambar 4. Oleh karena itu imobilisasi resin bekas pengolah limbah cair transuranium simulasi dengan polimer poliester tak jenuh ini akan memberikan karakteristik blok polimer-limbah hasil imobilisasi yang optimum pada kandungan limbah 20 % (b/b).

KESIMPULAN

Semakin tinggi kandungan limbah dalam polimer poliester tak jenuh, menyebabkan kenaikan densitas, akibat makin meningkatnya unsur-unsur berat. Kuat tekan naik dengan kenaikan kandungan limbah sampai nilai optimumnya yaitu sebesar 14,29 kN/cm² pada kandungan limbah TRU 20 % (b/b). Hal ini disebabkan oleh unsur-unsur limbah mengisi rongga antara ikatan-ikatan dalam struktur kerangka tiga dimensi polimer tersebut sebagai *filler*. Pada kandungan limbah di atas 20 % (b/b) rongga yang terbentuk tidak cukup mengungkung limbah yang ada, sehingga kekuatan tekannya semakin menurun. Pengaruh kandungan limbah terhadap laju pelindihan blok polimer-limbah menunjukkan bahwa makin besar kandungan limbah semakin besar pula laju pelindihan. Hal ini disebabkan konsentrasi radionuklida dalam polimer semakin besar sehingga perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong (*driving force*) proses difusi menjadi lebih besar. Polimer poliester tak jenuh dengan kandungan limbah TRU 20 % (b/b), densitas 0,99 g/cm³, kuat tekan 14,28 kN/cm² dan laju pelindihan 8,99 x 10⁻² g/cm²hari sebagai hasil terbaik.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, Characteristics of Solidified High Level Waste Product (Technical Report Series No. 187), IAEA, Vienna (1979).
2. P2TBDU, Laporan Analisis Radioaktivitas Unsur dari Radiometalurgi, P2TBDU, Serpong (2001), tidak terbit.
3. MARTONO H., Pengolahan Limbah Cair Hasil Sampung Pengujian Bahan Bakar Pasca Iradiasi Dari Instalasi Radiometalurgi (Prosiding Seminar Nasional XV Kimia Dalam Industri dan Lingkungan, Hotel Grand Mercure Yogyakarta, 7 Desember 2006), Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia Yayasan Media Kimia Utama, Yogyakarta (2006) 109-116.
4. IAEA, Treatment of Alpha Bearing Waste (Technical Report Series No. 287), IAEA, Vienna (1988).
5. AISYAH, Penggunaan Beberapa Jenis Polimer Untuk Imobilisasi Limbah Transuranium, Hasil Penelitian dan Kegiatan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Jakarta, 2004.
6. TATA SURDIA MS. and SHINROKU SAITO, Pengetahuan Bahan Teknik, PT. Pradnya Paramita, Jakarta (1992).
7. JOEL R. FRIED, Polymer Science and Technology, Prentice Hall Inc. USA (1995).
8. VAN VLACK, L.H., dan SRIATI DJAPRIE, Ilmu dan Teknologi Bahan (Ilmu Logam dan Bukan Logam), Erlangga, Jakarta (1986) 276.
9. Air Pendingin Reaktor (Prosiding Seminar Nasional XVI Kimia dalam Industri dan Lingkungan, Hotel Grand Mercure Yogyakarta, 6 Desember 2007), Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia Yayasan Media Kimia Utama, Yogyakarta (2007).
10. PNC-JAPAN, Characteristics of Waste-Glass, Tokai Works (1988), tidak terbit.
11. MARTONO H., Imobilisasi Limbah Cair Transuranium Simulasi Dengan Polimer Stiren Divinilbenzena, (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN, Yogyakarta, 25-27 April 1995), Pusat Penelitian Nuklir Yogyakarta, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta (1995) 316-321.
12. IAEA, Immobilization of Low and Intermediate Level Radioactive Waste With Polymers (Technical Report Series No. 289), IAEA, Vienna (1988).

