

## PENGOLAHAN LIMBAH CAIR HASIL SAMPING PENGUJIAN BAHAN BAKAR PASCA IRADIASI DARI INSTALASI RADIOMETALURGI

**Herlan Martono, Aisyah, Wati**

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN

### **ABSTRAK**

PENGOLAHAN LIMBAH CAIR HASIL SAMPING PENGUJIAN BAHAN BAKAR PASCA IRADIASI DARI INSTALASI RADIOMETALURGI. Pada pengujian bahan bakar pasca iradiasi di Instalasi Radiometalurgi ditimbulkan limbah yang dapat dikategorikan sebagai limbah cair transuranium. Telah dilakukan penelitian resin epoksi dengan *absorber* zeolit dan bentonit untuk mengetahui kualitas blok polimer-limbah sebagai fungsi kandungan limbah. Polimerisasi dilakukan dengan mencampur resin epoksi dan *hardener* pada rasio 1:1, kemudian ditambah limbah cair transuranium simulasi dan *absorber*. Rasio limbah/*absorber*, yaitu 1/1, 2/1, 3/1, 4/1, dan 5/1 untuk menentukan rasio optimum limbah terhadap *absorber*. Masing-masing rasio limbah/*absorber* diimobilisasi dengan polimer epoksi dengan kandungan limbah 20 %. Blok polimer-limbah yang terjadi diukur densitas, kuat tekan dengan alat Paul Weber, dan laju pelindihan dengan alat Sokhlet pada 100 °C dan 1 atm selama 6 jam. Rasio optimum limbah/zeolit yang telah diperoleh yaitu 2/1 dan limbah/bentonit adalah 1/1. Rasio optimum limbah/*absorber* digunakan untuk membuat blok polimer-limbah dengan kandungan limbah 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 % berat. Blok polimer-limbah sebagai fungsi kandungan limbah ditentukan densitas, kuat tekan dan laju pelindihannya. Semakin besar kandungan limbah maka kuat tekan blok polimer-limbah semakin kecil, sedangkan laju pelindihannya semakin besar. Berdasarkan kuat tekan dan laju pelindihan, maka hasil terbaik diperoleh untuk blok polimer-limbah dengan *absorber* zeolit pada kandungan limbah 30 %.

Kata kunci: Limbah transuranium, imobilisasi, polimer

### **ABSTRACT**

*TREATMENT OF BY PRODUCT LIQUID WASTE ARISING FROM TESTING OF IRRADIATED FUEL FROM RADIOMETALLURGY INSTALLATION. On testing of irradiated spent fuel in Radiometallurgy Installation arising transuranic liquid waste. The research using epoxy resin with absorbers zeolite and bentonite has been conducted to determine the quality of waste-polymer blocks as function of waste loading. Polymerization was done by mix epoxy resin and hardener at ratio 1:1, then added simulated transuranic liquid waste and the absorber. Simulated transuranic liquid waste was made on variation of the ratio waste to absorber i. e. 1/1, 2/1, 3/1, 4/1, and 5/1 to determine the optimum ratio. Every ratio was immobilized with epoxy resin in waste loading 20 %. These immobilization products were measured its density, compressive strength by Paul Weber compactor and leaching rate by Soxhlet apparatus at 100 °C and 1 atm for 6 hours. The optimum ratio which has been determined for waste to zeolit was 2/1 and waste to bentonit was 1/1. The optimum ratio waste to absorber was used in process of making waste-polymer as function of waste loading. The waste loading in the polymer were made various are 10, 20, 30, 40, 50, and 60 weight %. Waste-polymer blocks as function of waste loading were determined density, compressive strenght, and leaching rate. The higher of waste loading in the polymer as immobilization product cause the lower of compressive strength but the higher of leaching rate. Based on compressive strength and leaching rate test, the best immobilization was obtained to waste-polymer block with zeolit as the absorber in waste loading of 30 %.*

*Keyword: Transuranic waste, immobilization, polymer*

### **PENDAHULUAN**

Limbah Cair Aktivitas Tinggi (LCAT) umumnya dihasilkan pada ekstraksi siklus I proses olah ulang bahan bakar bekas reaktor nuklir, sedangkan Limbah Cair Transuranium (LCTRU) dihasilkan pada 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. Uranium dan

plutonium yang diambil dari bahan bakar bekas dapat diproses sebagai bahan bakar campuran ( $UO_2$ ,  $PuO_2$ ) dalam reaktor pembiak (*fast breeder reactor*).

Komposisi LCAT, komponen utama adalah hasil belah (*fission product*) yang terkontaminasi aktinida. Pada umumnya LCTRU berupa pelarut bekas dari proses olah ulang bahan bakar bekas. Limbah tersebut banyak mengandung aktinida dan sedikit hasil belah, oleh karena itu LCTRU memiliki toksisitas yang tinggi dan berumur panjang. Demikian pula LCAT juga berumur panjang.

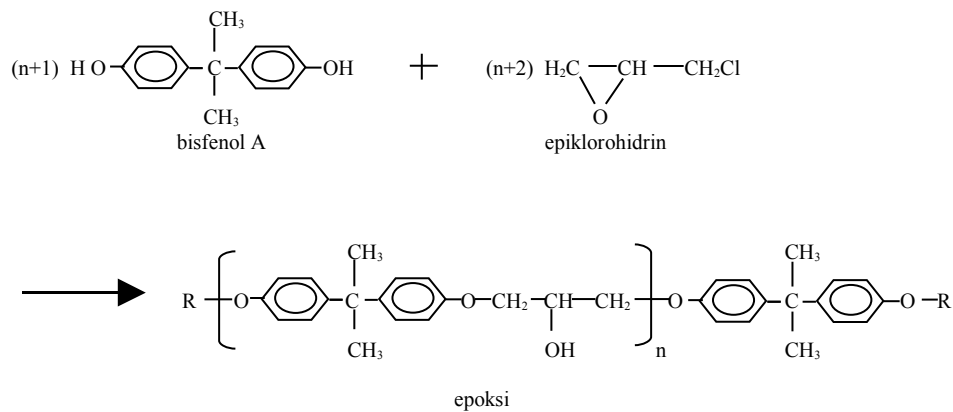
Di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR), isotop Mo dibuat dari U diperkaya 93 % yang diiradiasi dengan neutron dalam reaktor G. A. Siwabessy. Produk iradiasi yaitu hasil belah termasuk Mo dan sedikit atau hampir tidak terjadi aktinida[2]. Setelah U sisa dipisahkan, limbah aktivitas tinggi jenis ini disimpan dalam tempat Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. Setelah 4-5 tahun jenis limbah ini menjadi limbah aktivitas rendah yang diimobilisasi dengan semen di Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR).

Di Instalasi Radiometalurgi (IRM) bahan bakar yang diiradiasi dengan pengkayaan U 20 %. Hasil iradiasi bahan bakar dalam reaktor adalah hasil belah dan aktinida. Pada pengujian di IRM, bahan bakar teriradiasi ini dilarutkan dalam  $HNO_3$  6-8 N. Supaya sesuai dengan definisi LCAT dan LCTRU dari proses olah ulang bahan bakar bekas, maka hasil belah dan aktinida dalam limbah cair IRM harus dipisahkan sehingga diperoleh LCAT dan LCTRU [2].

Data dari IRM aktivitas total limbah cair, yaitu 122,608 Bq/ml dengan radionuklida dominan Cs-137[3]. Berdasarkan data tersebut, maka dipelajari aktivitas limbah cair sebagai fungsi waktu untuk menentukan bahan matriks yang digunakan dalam proses imobilisasi. Pada pengujian menunjukkan bahwa limbah cair mengandung aktinida berumur paro panjang. 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. Polimer merupakan bahan yang cocok untuk imobilisasi limbah cair dari IRM.

Pada polimerisasi terjadi perubahan fase cair dan pasta menjadi padat. Proses ini disebut *curing* atau pengeringan. Proses terjadi secara fisika karena adanya penguapan pelarut atau medium pendispersi. *Curing* dapat juga terjadi karena perubahan kimia, yaitu terjadinya reaksi antara molekul-molekul yang relatif kecil dengan fase cair atau pasta membentuk jaringan molekul yang lebih besar, padat, dan tidak mudah larut.

Pada penelitian ini digunakan reaksi polimerisasi dengan *curing* bersifat eksotermis, karena proses dapat dilakukan dengan peralatan sederhana dan biaya yang murah. Kadang-kadang *curing* perlu waktu lama[4]. Polimer yang digunakan dalam penelitian ini adalah resin epoksi. Resin epoksi merupakan jenis polimer yang banyak digunakan sebagai material struktur. Resin epoksi terbentuk dari reaksi antara epiklorohidrin dengan bifenilpropana (bisfenol A), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[5].



Gambar 1. Pembentukan epoksi oleh reaksi bisfenol A dan epiklorohidrin

Resin epoksi memiliki sifat unggul, diantaranya kekuatan mekanik yang baik, tahan terhadap bahan kimia, adesif dan mudah diproses. Berdasarkan pada keunggulan ini, maka resin epoksi dipilih untuk imobilisasi limbah radioaktif.

Di pasaran terdapat beberapa merk resin epoksi yang mempunyai karakteristik berbeda-beda. Resin epoksi EPOSIR 7120 dipilih untuk penelitian ini, karena dalam studi pendahuluan resin ini mampu membentuk bahan keras dengan campuran air sampai 33 % volume, selain harganya murah.

Hasil imobilisasi LCTRU dipengaruhi oleh kandungan limbah atau *waste loading* (WL) dan bahan aditif yang digunakan untuk menyerap air limbah tersebut. Adapun bahan aditif yang digunakan dalam penelitian ini adalah bentonit dan zeolit.

Bentonit merupakan batuan *clay* yang mengandung mineral smektit sebagai komponen utama. Adanya smektit memberikan sifat bentonit memiliki konduktivitas hidraulik yang rendah. Oleh karena itu, koefisien difusi merupakan parameter penting untuk unjuk kerja bentonit dalam proses imobilisasi. Zeolit merupakan senyawa alumino silikat dengan struktur sangkar, biasanya diperoleh dari alam yang masih tercampur dengan mineral lain, seperti kalsit, feldspar, gipsum, dan kuarsa. Zeolit memiliki komposisi kimia yang tergantung pada kondisi hidrotermal lingkungan lokal, seperti suhu dan tekanan uap air. Komposisi kimia tersebut mempengaruhi kemampuan zeolit dalam menyerap air, sehingga pengkajian unjuk kerja zeolit dalam proses imobilisasi juga dipengaruhi oleh komposisi kimianya. Zeolit yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari daerah Lampung.

Blok polimer limbah 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 :

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

dimana:  $\rho$  = densitas ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m$  = massa sampel (g),  $V$  = volume sampel ( $\text{cm}^3$ ).

Kuat tekan adalah gaya maksimum yang dibutuhkan untuk menghancurkan benda uji dibagi dengan 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 :

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

dimana:  $\sigma_c$  = kuat tekan ( $\text{kN/cm}^2$ ),  $P_{maks}$  = beban tekanan maksimum (kN),  $A$  = luas penampang ( $\text{cm}^2$ ).

Laju pelindihan merupakan salah satu karakteristik blok polimer limbah yang penting untuk mengevaluasi hasil imobilisasi, karena tujuan akhir imobilisasi limbah adalah memperkecil potensi terlepasnya radionuklida yang ada dalam limbah itu ke lingkungan. Laju pelindihan dalam hal ini dapat diasumsikan sebagai korosi, yaitu lepasnya unsur kerangka polimer ditambah laju pelindihannya sendiri, yaitu lepasnya sejumlah unsur limbah dari blok polimer limbah. Laju pelindihan dipercepat digunakan pada penelitian jangka pendek untuk mengetahui pengaruh beberapa parameter dan untuk mengevaluasi kualitas hasil imobilisasi. Pengujian ini menggunakan alat Soxhlet pada suhu  $100^\circ\text{C}$  dan tekanan 1 atm. Dalam penelitian ini laju pelindihan ditentukan dengan mengukur kehilangan berat sampel setelah diekstraksi selama 6 jam [6,7]. Laju pelindihan dinyatakan dengan persamaan :

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

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

## TATA KERJA

### Bahan

Limbah radioaktif cair dari IRM aktivitas jenis  $3,314 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml}$  dan resin epoksi EPOSIR 7120, cesium karbonat ( $\text{Cs}_2\text{CO}_3$ ) dari Merck dan cerium (IV) oksida ( $\text{CeO}_2$ ) dari Sigma Chem.Co. *Absorber* yang digunakan bentonit ( $\text{H}_2\text{Al}_2\text{O}_6\text{Si}$ , FW 180,06, 80-100 mesh) dari Aldrich dan zeolit dari Lampung dengan ukuran 40-60 mesh.

### Metode

Klasifikasi limbah dilakukan dengan cara mengencerkan 7  $\mu\text{l}$  limbah cair dari IRM dengan aktivitas 122.608 Bq/ml ( $3,314 \times 10^{-3} \mu\text{Ci/ml}$ ) ke dalam air bebas mineral hingga volume 500 ml.

Pencacahan larutan dilakukan dengan alat cacah radiasi gamma *Multi Channel Analyzer* (MCA). Data yang diperoleh dibuat grafik aktivitas limbah versus waktu peluruhan kemudian dibandingkan dengan grafik aktivitas Cs-137 versus waktu peluruhan secara teoritis.

Pembuatan limbah cair simulasi dilakukan dengan melarutkan  $Cs_2CO_3$  dan  $CeO_2$  dalam air bebas mineral. Limbah cair simulasi yang terbentuk dicampur dengan absorber dalam berbagai rasio berat limbah/*absorber* yaitu 1/1, 2/1, 3/1, 4/1, dan 5/1 untuk mencari rasio optimum limbah/*absorber*. Sebagai pengungkungnya digunakan resin epoksi EPOSIR 7120 yang dicampur dengan bahan pengeras (*hardener*) dengan perbandingan 1:1 (perbandingan sesuai dengan petunjuk aplikasi). Rasio optimum limbah/*absorber* dicari pada WL 20 %. Pengadukan campuran dilakukan selama 10 menit, kemudian campuran yang telah homogen dimasukkan ke dalam blok cetakan silinder yang berukuran tinggi 24,5 mm dan diameter 29,5 mm dan dibiarkan mengeras selama 8 jam.

Pengukuran densitas dan pengujian kuat tekan serta laju pelindihan dilakukan pada sampel yang telah mengeras. Pengukuran densitas dilakukan dengan cara mengukur tinggi dan diameter sampel dengan jangka sorong serta menimbang blok polimer limbah yang telah berulang-ulang dimasukkan dalam oven dan desikator hingga diperoleh berat konstan. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan alat Paul Weber dan laju pelindihan dengan alat Soxhlet pada 100 °C, 1 atm. Kecepatan aliran atau laju kondensasi pada alat Soxhlet dijaga tetap pada 300 cm<sup>3</sup>/jam.

Pembuatan limbah cair simulasi dengan berbagai WL yaitu 10, 20, 30, 40, 50, dan 60 % berat dilakukan setelah rasio optimum limbah/*absorber* ditentukan. Hasil imobilisasi pada berbagai WL tersebut ditentukan densitas, kuat tekan dan laju pelindihannya .

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

Data komposisi limbah radioaktif cair dari IRM ditunjukkan pada Tabel 1. Dari data tersebut radionuklida yang dominan adalah Cs-137. Pengaruh radionuklida yang lain (kemungkinan dari data komposisi limbah terdapat aktinida atau radionuklida umur panjang yang tidak terdeteksi) dipelajari dari percobaan aktivitas limbah sebagai fungsi waktu peluruhan.

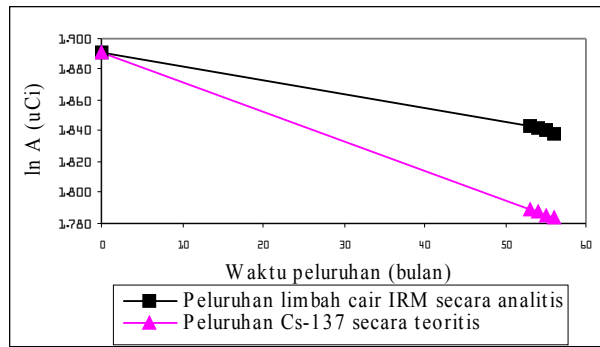
Hubungan aktivitas limbah cair IRM hasil pengukuran sebagai fungsi waktu peluruhan dan aktivitas Cs-137 fungsi waktu dari perhitungan secara teoritis ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik aktivitas limbah sebagai fungsi waktu peluruhan memperlihatkan bahwa aktivitas limbah cair IRM hasil analisis meluruh lebih lama dengan  $\lambda_{\text{rata}}$  sebesar  $9,2245 \times 10^{-4}$  /bulan ( $t_{1/2} = 62,580$  tahun) dibandingkan dengan aktivitas Cs-137 secara teoritis dengan  $\lambda$  sebesar  $1,925 \times 10^{-3}$  /bulan ( $t_{1/2} = 30$  tahun). Hal ini menunjukkan bahwa limbah IRM selain Cs-137 juga mengandung radionuklida lain yang tidak terdeteksi dengan umur paro yang lebih panjang.

Tabel 1. Unsur radionuklida dalam limbah cair dari IRM [3]

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

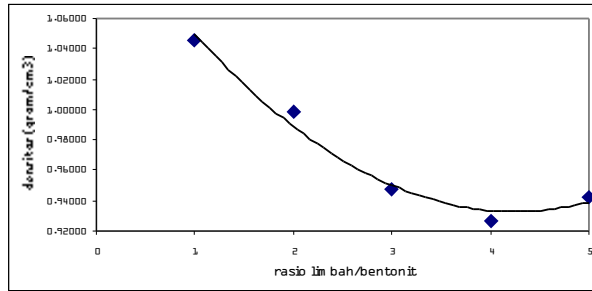
Hubungan aktivitas limbah cair IRM hasil pengukuran sebagai fungsi waktu peluruhan dan aktivitas Cs-137 fungsi waktu dari perhitungan secara teoritis ditunjukkan pada Gambar 2. Grafik aktivitas limbah sebagai fungsi waktu peluruhan memperlihatkan bahwa aktivitas limbah cair IRM hasil analisis meluruh lebih lama dengan  $\lambda$  rata sebesar  $9,2245 \times 10^{-4}$  /bulan ( $t_{1/2} = 62,580$  tahun) dibandingkan dengan aktivitas Cs-137 secara teoritis dengan  $\lambda$  sebesar  $1,925 \times 10^{-3}$  /bulan ( $t_{1/2} = 30$  tahun). Hal ini menunjukkan bahwa limbah IRM selain Cs-137 juga mengandung radionuklida lain yang tidak terdeteksi dengan umur paro yang lebih panjang.

Pengamatan secara visual hasil imobilisasi limbah IRM dengan resin epoksi menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan limbah maka warna blok polimer-limbah hasil imobilisasi lebih keabuan, sedangkan untuk polimer tanpa limbah tampak warna kuning. Hal ini terjadi karena adanya penambahan cairan limbah simulasi yang mengandung aktinida[7].

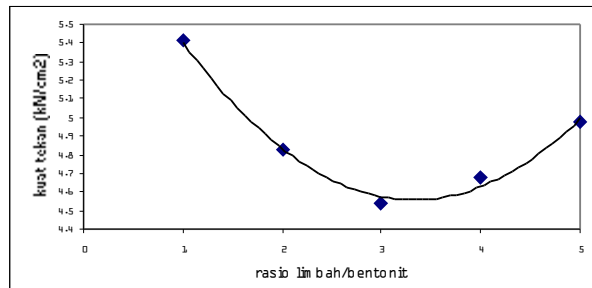


Gambar 2. Grafik logaritma aktivitas limbah cair IRM sebagai fungsi waktu peluruhan.

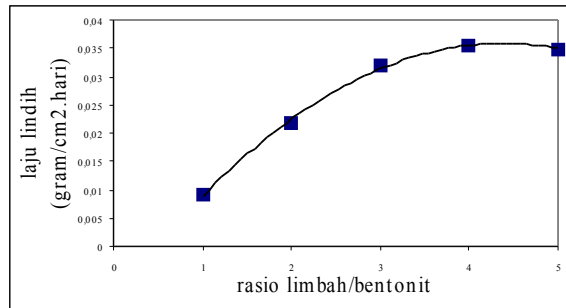
Rasio optimum limbah/absorber ditentukan pada WL 20 %, karena WL tersebut pada umumnya terdapat dalam hasil imobilisasi. Penentuan rasio optimum limbah/bentonit untuk blok polimer-limbah didasarkan pada Gambar 3, 4, dan 5.



Gambar 3. Pengaruh rasio limbah/bentonit dengan WL 20 % terhadap densitas

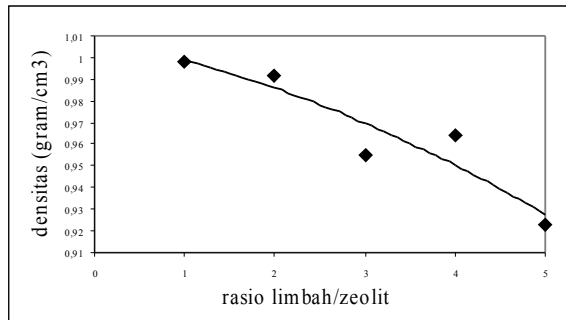


Gambar 4. Pengaruh rasio limbah/bentonit dengan WL 20 % terhadap kuat tekan

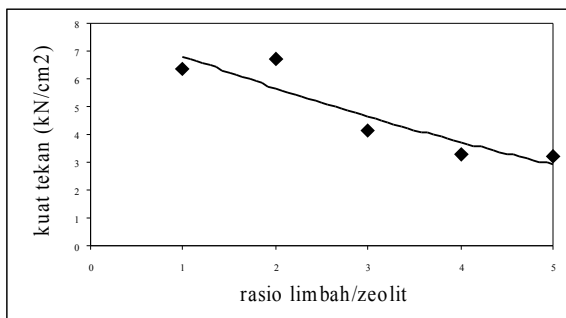


Gambar 5. Pengaruh rasio limbah/bentonit dengan WL 20 % terhadap laju lindih

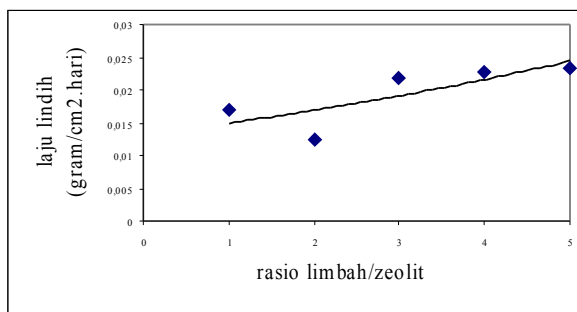
Berdasarkan Gambar 3, 4, dan 5, maka rasio limbah/absorber 1/1 merupakan rasio optimum untuk blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit, karena pada rasio itu menunjukkan densitas dan kuat tekan maksimum, sedangkan laju pelindihan minimum. Penentuan rasio optimum limbah/zeolit untuk blok polimer-limbah didasarkan Gambar 6, 7, dan 8.



Gambar 6. Pengaruh rasio limbah/zeolit dengan WL 20 % terhadap densitas



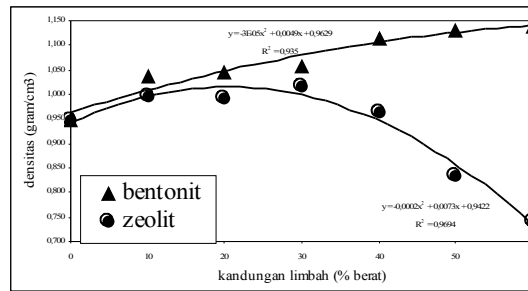
Gambar 7. Pengaruh rasio limbah/zeolit dengan WL 20 % terhadap kuat tekan



Gambar 8. Pengaruh rasio limbah/zeolit dengan WL 20 % terhadap laju lindih

Berdasarkan Gambar 6, 7, dan 8, maka rasio 2/1 merupakan rasio optimum limbah/zeolit untuk blok polimer limbah dengan *absorber* zeolit, karena pada rasio 2/1 menunjukkan densitas dan kuat tekan yang maksimum, sedangkan laju pelindihannya minimum.

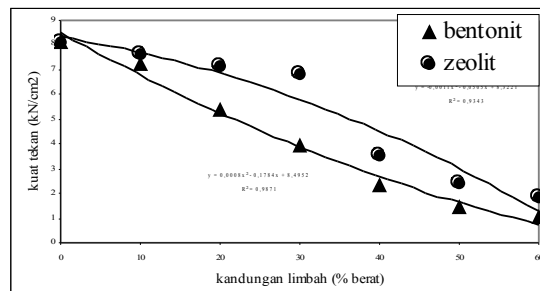
Hubungan WL dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap densitas blok polimer-limbah ditunjukkan pada Gambar 9. Semakin besar WL, maka semakin besar densitasnya. Hal ini karena persentase radionuklida berat dalam polimer epoksi semakin besar. Persentase WL yang semakin besar, mengakibatkan persentase polimer kecil, sehingga densitas polimer makin besar. Pada penggunaan *absorber* zeolit setelah WL 30 % densitas menurun. Hal ini disebabkan karena kurang baiknya *absorber* zeolit untuk menyerap limbah cair, sehingga masih ada air yang harus diikat oleh polimer. Air yang tidak terikat oleh polimer keluar dari blok polimer-limbah setelah selesai *curing*. Oleh karena itu, semakin banyak WL, maka massa blok polimer-limbah semakin berkurang.



Gambar 9. Pengaruh kandungan limbah dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap densitas blok polimer-limbah

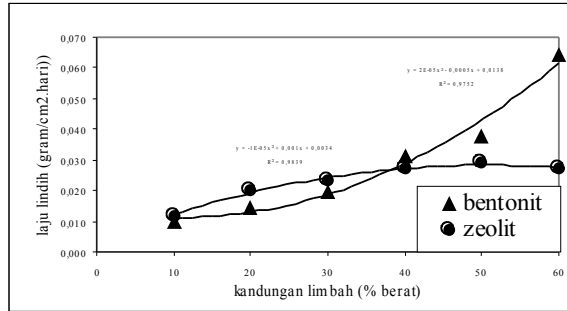
Hubungan kandungan limbah dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap kuat tekan blok polimer-limbah ditunjukkan pada Gambar 10. Pengujian kuat tekan pada blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit maupun zeolit menunjukkan bahwa semakin besar WL, maka semakin kecil kuat tekannya. Hal ini terjadi karena polimer epoksi mempunyai struktur linier. Adanya persentase WL yang semakin besar, maka persentase polimernya semakin sedikit. Ini berarti bahwa rantai polimer yang terbentuk semakin pendek. Dengan rantai polimer yang semakin pendek dan volume blok polimer-limbah yang semakin besar maka tiap lapisan rantai polimer tidak cukup untuk mengungkung limbah sehingga kekuatan tekannya semakin turun.

Hubungan WL dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap laju pelindihan blok polimer-limbah ditunjukkan pada Gambar 11. Semakin besar WL semakin besar pula laju pelindihan. Hal ini karena konsentrasi radionuklida dalam rongga antara ikatan polimer semakin besar sehingga perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong proses difusi menjadi lebih besar. Pada percobaan dengan WL 50 % dan 60 % perubahan warna pada air lindih menjadi keruh disebabkan karena adanya intrusi air ke dalam blok polimer limbah sehingga melarutkan bentonit dan zeolit dari blok polimer-limbah. Selain itu, pada WL tersebut blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit memiliki laju pelindihan yang tinggi, hal ini dikarenakan bentonit mengalami *swelling*.



Gambar 10. Pengaruh kandungan limbah dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap kuat tekan blok polimer-limbah

Hubungan WL dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap laju pelindihan blok polimer-limbah ditunjukkan pada Gambar 11. Semakin besar WL semakin besar pula laju pelindihan. Hal ini karena konsentrasi radionuklida dalam rongga antara ikatan polimer semakin besar sehingga perbedaan konsentrasi sebagai gaya dorong proses difusi menjadi lebih besar. Pada percobaan dengan WL 50 % dan 60 % perubahan warna pada air lindih menjadi keruh disebabkan karena adanya intrusi air ke dalam blok polimer limbah sehingga melarutkan bentonit dan zeolit dari blok polimer-limbah. Selain itu, pada WL tersebut blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit memiliki laju pelindihan yang tinggi, hal ini dikarenakan bentonit mengalami *swelling*.



Gambar 11. Pengaruh kandungan limbah dengan *absorber* bentonit dan zeolit terhadap laju pelindihan blok polimer-limbah

Berdasarkan Gambar 9, 10, dan 11, maka blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit pada WL 20 % berat merupakan hasil imobilisasi terbaik. Hal ini karena laju pelindihan pada WL 20 % tidak terlalu besar dibandingkan pada WL10 %, tetapi jauh lebih kecil daripada WL 30 % dan densitas blok polimer-limbah pada WL 20 % tidak terlalu besar dibandingkan densitas blok polimer-limbah pada WL 10 % walaupun kuat tekan WL 20 % lebih kecil daripada WL 10 %. Blok polimer-limbah dengan *absorber* zeolit pada WL 30 % berat merupakan hasil imobilisasi terbaik karena laju pelindihan pada WL 30 % tidak terlalu besar dibandingkan pada WL 20 %, tetapi jauh lebih kecil daripada WL 40 % dan densitas blok polimer-limbah pada WL 30 % tidak terlalu besar dibandingkan densitas blok polimer-limbah pada WL 20 %. Densitas akan mengalami penurunan yang drastis setelah WL 30 %, walaupun kuat tekan WL 30 % lebih kecil daripada WL 20 %.

**KESIMPULAN**

Rasio 1/1 merupakan rasio optimum limbah/bentonit, sedangkan rasio 2/1 merupakan rasio optimum limbah/zeolit pada blok polimer-limbah. Semakin besar kandungan limbah cair dengan *absorber* bentonit maka densitasnya semakin besar. Semakin besar kandungan limbah cair dengan *absorber* zeolit maka densitasnya semakin besar, dan setelah WL 30% densitasnya turun. Semakin besar kandungan limbah cair dengan *absorber* bentonit maka kuat tekannya semakin kecil, demikian pula pada *absorber* zeolit. Kuat tekan blok polimer-limbah dengan *absorber* zeolit lebih besar daripada blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit. Semakin besar kandungan limbah cair dengan *absorber* bentonit maka laju pelindihannya semakin besar, demikian pula pada *absorber* zeolit. Laju pelindihan pada kandungan limbah blok polimer-limbah dengan *absorber* bentonit lebih besar daripada blok polimer-limbah dengan *absorber* zeolit. Berdasarkan pertimbangan kuat tekan dan laju pelindihan blok polimer-limbah, maka hasil terbaik diperoleh untuk blok polimer-limbah dengan *absorber* zeolit pada kandungan limbah 30%.

**DAFTAR PUSTAKA**

1. International Atomic Energy Agency (1979) Characteristics of Solidified High Level Waste Product, Technical Report Series No. 187, IAEA, Vienna,
2. Martono, H (1997) Status Penelitian Dan Pengembangan Pengelolaan Limbah Aktivitas Tinggi di Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Pengolahan Limbah I, Serpong, Desember
3. PTBDU (2001) Laporan Analisis Radioaktivitas Unsur dari Radiometalurgi”, P2TBDU, Serpong

4. International Atomic Energy Agency (1988) Immobilization of Low and Intermediate Level Radioactive Waste with Polymer”, Technical Report Series No. 289, IAEA, Vienna.
5. Aisyah (2004) Pengaruh Keasaman dan Kandungan Limbah Pada Imobilisasi Limbah TRU dari Instalasi Radiometalurgi dengan Polimer”, Hasil Penelitian Pusat Pengembangan Pengelolaan Limbah Radioaktif 2003, P2PLR BATAN
6. PNC-JAPAN (1988) Characteristics of Waste-Glass”, Tokai Works, 1988.
7. Martono, H (2006) Imobilisasi Limbah Cair Transuranium Simulasi Dengan Polimer Stiren Divinilbenzena”, Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Nuklir, Yogyakarta