



Imobilisasi Limbah Radioaktif dari Produksi Radioisotop Molibdenum-99 (^{99}Mo) Menggunakan Bahan Matriks Synroc Titanat

Gunandjar*, Titik Sundari, dan Yuli Purwanto

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTLR-BATAN)
Kawasan Puspiptek Serpong Gedung 50 Tangerang Selatan, Banten, 15310

*E-mail:gunand-m@batan.go.id

Abstract

The Immobilization Of Radioactive Wastes Generated From Molybdenum-99 (Mo-99) Radioisotope Production Using Titanate Synroc Matrix Materials. The assessment of immobilization technology using synroc matrix material for the long life radioactive liquid wastes generated from Mo-99 radioisotope production containing of uranium, transuranic and fission product elements was carried out. For that purpose have been developed the titanate synroc matrix material by hot isostatic pressing process. All basic science studies confirm that the leach-rates and α -decay damage in synroc relatively very low and acceptable. In Indonesia, adaptation of immobilization technology using titanate of synroc matrix materials was carried-out for immobilization of the long life radioactive liquid wastes generated from ^{99}Mo radioisotope production by sintering process at high temperature. Immobilization process was carried-out by mix the radioactive waste with precursor oxides, then drying the mixture at 100 °C, calcination at 750 °C, then it was pressed in the moulder. Further process are sintering at the temperature of 1000-1300 °C with the time 1-4 hours to form the solid multiphase ceramic. The composition of precursor oxides for titanate synroc (in % weight) i.e : Al_2O_3 (5.4); BaO (5.6); CaO (11.0); TiO_2 (71.4) and ZrO_2 (6.6). Waste loading in the waste synroc block are 10 – 60 % weight. The quality of the synroc block was determined by testing of density, pressing strength, and leaching-rate. The testing results showed that the best quality of waste synroc block was obtained at the waste loading 20% weight, sintering process at 1200 °C for 3 hours with values of density 3.35 g/cm³, pressing strength 14.18 kN/cm², total leaching-rate 2.5.10⁻³ g.cm⁻².day⁻¹, and leaching-rate of U, Cs, Sr, and U are 4.1x.10⁻⁴ g.cm⁻².day⁻¹, 2.3x10⁻⁶ g.cm⁻².day⁻¹ and 6.3x10⁻⁷ g.cm⁻².hari⁻¹ respectively. The titanate synroc matrix materials can succeed for immobilization of liquid radioactive waste containing of U, Cs and Sr elements, so that it is very good for immobilization for the radioactive waste generated from ^{99}Mo production.

Keywords: immobilization, radioactive waste, ^{99}Mo production, synroc.

Pendahuluan

Pemanfaatan radioisotop di bidang kesehatan antara lain adalah untuk terapi dan diagnosis. Salah satu radioisotop yang secara luas digunakan dalam kedokteran nuklir untuk diagnosis adalah technesium-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$). Radioisotop ini mempunyai umur paro ($T_{1/2}$) sangat pendek yaitu hanya 6 jam, sehingga sangat sesuai untuk keperluan diagnosis. Radioisotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dipakai hampir 80 % dari seluruh diagnostik dalam kedokteran nuklir, yaitu antara lain untuk mendapatkan gambaran tulang, otak, *thyroid*, paru-paru, hati, dan ginjal. Radioisotop $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ini disediakan melalui peralatan *generator* yang mengandung radioisotop molibdenum-99 (^{99}Mo) yang peluruhannya menghasilkan $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Radioisotop ^{99}Mo diproduksi melalui jalur hasil belah (hasil fisi) dari bahan bakar uranium oksida yang diperkaya dengan ^{235}U yang diiradiasi di dalam reaktor nuklir. Iradiasi uranium oksida tersebut menghasilkan ^{99}Mo dan radionuklida hasil belah yang lain (IAEA, 1998). Reaksi pembentukan ^{99}Mo dalam reaktor adalah:



Selanjutnya untuk keperluan diagnosis, *generator* yang mengandung radioisotop ^{99}Mo menghasilkan $^{99\text{m}}\text{Tc}$ dari reaksi peluruhan :



Pada proses produksi ^{99}Mo , setelah ^{99}Mo dipisahkan dari target uranium oksida teriradiasi, maka timbul limbah radioaktif yang mengandung radionuklida hasil belah dan aktinida atau transuranium (TRU) serta sisa uranium.





Limbah ini termasuk limbah pemancar alfa umur panjang yang mengandung ^{238}U ($T_{1/2} = 4,5 \times 10^9$ tahun) dan ^{235}U ($T_{1/2} = 7,1 \times 10^8$ tahun) (IAEA, 1998).

Dalam proses produksi ^{99}Mo , target uranium oksida yang diiradiasi dengan neutron di dalam reaktor nuklir diperoleh ^{99}Mo yang merupakan salah satu nuklida hasil belah dari ^{235}U dan berbagai nuklida hasil belah yang lain. Hasil iradiasi uranium oksida tersebut kemudian dilarutkan ke dalam asam nitrat dan ^{99}Mo dipisahkan dengan adsorpsi menggunakan kolom alumina. Pemisahan ^{99}Mo dari kolom dengan elusi menggunakan ammonia. Limbah yang ditimbulkan dari proses tersebut adalah limbah cair yang mengandung banyak uranium sisa dan unsur-unsur hasil belah yang tidak diinginkan. Jenis limbah tersebut masuk dalam katagori limbah radioaktif umur panjang yang mengandung kira-kira 0,8 M larutan asam nitrat dan sejumlah kecil ammonium nitrat (Levins, D.M., 1997). Komposisi utama limbah cair radioaktif dari produksi radioisotop ^{99}Mo adalah uranium sisa (^{235}U , ^{238}U), ^{239}Pu , ^3H , dan radionuklida hasil belah yaitu ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{75}Se , ^{95}Zr , ^{99}Mo , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{106}Ru , ^{105}Rh , ^{113}Sn , ^{124}Sb , dan ^{65}Zn (IAEA, 1998).

Di Indonesia, proses iradiasi target uranium oksida (diperkaya ^{235}U) dilakukan di dalam Reaktor Serbaguna G.A.Siwabessy yaitu reaktor nuklir jenis MTR (*Multipurpose Test Reactor*). Selanjutnya produksi radioisotop ^{99}Mo dilakukan di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR), sedang penelitian dan pengembangan teknologi pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan di PTLR-BATAN. Ketiga fasilitas tersebut berada di Fasilitas Penelitian Tenaga Nuklir Kawasan Puspptek Serpong, Banten. Limbah radioaktif cair radioaktif tingkat tinggi (LCRTT) yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) mengandung unsur-unsur hasil belah, sisa uranium, dan unsur-unsur aktinida (TRU) minor. Setelah disimpan selama dua tahun aktivitasnya turun dan digolongkan menjadi limbah cair radioaktif tingkat sedang (LCRTS) umur panjang karena mengandung uranium yang umur paronya panjang.

PTLR-BATAN telah menerapkan teknologi sementasi yaitu teknologi imobilisasi limbah radioaktif menggunakan bahan matriks semen khususnya untuk imobilisasi limbah radioaktif tingkat rendah (LRTR) dan limbah radioaktif tingkat sedang (LRTS) umur paro pendek ($T_{1/2} \leq 30$ tahun). Selanjutnya untuk mendukung program pemanfaatan tenaga nuklir di bidang kedokteran nuklir, maka perlu disiapkan teknologi imobilisasi limbah radioaktif umur panjang yang ditimbulkan dari produksi radioisotop ^{99}Mo menjadi kemasan limbah yang mampu bertahan selama waktu penyimpanan lestari (disposal). Imobilisasi jenis limbah ini telah dikembangkan di PTLR-BATAN dengan teknik vitrifikasi (Martono, H dan Aisyah, 2002 ; Martono, H dan Widiatmo, 2002) dan dengan teknik polimerisasi (Aisyah, dkk., 2004). Seding hasil-hasil penelitian dan pengembangan *synroc* yang telah dilakukan oleh negara-negara maju di bidang nuklir mempunyai prospek yang lebih baik dan dapat diadopsi dan dikembangkan sebagai alternatif untuk imobilisasi LCRTS yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo di IPR.

Penerapan teknologi pengelolaan limbah radioaktif yang optimal dalam mendukung program pemanfaatan tenaga nuklir di Indonesia ditujukan untuk menjamin keselamatan pekerja maupun masyarakat serta untuk perlindungan lingkungan hidup terhadap potensi bahaya radiasi baik untuk generasi sekarang dan yang akan datang. Mengingat pentingnya masalah tersebut, maka dalam makalah ini disajikan hasil penelitian imobilisasi limbah radioaktif yang ditimbulkan dari produksi radioisotop ^{99}Mo dengan bahan matriks *synroc* titanat melalui proses sintering suhu tinggi sebagai pengembangan dan alternatif proses pres-panas isostatik. Optimasi proses imobilisasi dilakukan dengan parameter suhu sintering, waktu sintering, dan tingkat muat limbah. Kualitas blok *synroc* limbah hasil imobilisasi dilakukan pengujian berdasarkan densitas, kuat tekan dan laju pelindihan dalam fasa air.

Dasar Teori

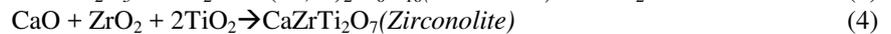
Di negara-negara maju di bidang nuklir, strategi saat ini pengelolaan LCRTT umur panjang yang mengandung unsur-unsur hasil belah (hasil fisi), uranium, dan aktinida atau TRU dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas dilakukan imobilisasi melalui solidifikasi (pemadatan) dalam gelas borosilikat (proses vitrifikasi), yang diikuti dengan penyimpanan lestari pada formasi tanah dalam (*Deep Geological Disposal Facility*). Strategi ini ternyata masih menghadapi masalah karena hasil penelitian para ahli geokimia bahwa gelas borosilikat limbah (hasil imobilisasi LCRTT dengan teknik vitrifikasi) ternyata masih kurang stabil bila disimpan di dalam tanah akibat adanya pemanasan gamma (*gamma heating*) di dalam gelas dan perbedaan suhu bumi (*geothermal gradient*) yang dapat menimbulkan suhu lebih dari 100 °C. Selain itu tidak dapat dijamin terhindar kontak air tanah dengan gelas, walaupun serangkaian lapisan tambahan seperti wadah limbah dari logam (*metal container*) dan bungkus luar (*overpack*) dari tanah liat telah digunakan di dalam fasilitas penyimpanan lestari pada formasi tanah dalam (Vance, E.R., 1999). Dengan alasan tersebut maka pengembangan teknologi imobilisasi LCRTT terus diarahkan untuk mencari teknologi yang lebih baik. Salah satu teknologi yang telah dikembangkan adalah metode *Synroc* (*Synthetic rock*) yaitu metode proses pembentukan *synroc*.

Pada tahun 1978 ditemukan *synroctitanat* yang merupakan gabungan mineral titanat yang jauh lebih tahan terhadap air dibanding dengan sederetan mineral-mineral *supercalcine* (Ringwood, A.E., dkk, 1979). *Synroc* titanat adalah suatu bahan imobilisasi limbah bentuk kristalin yang terdiri dari gabungan fase-fase kristal titanat yang stabil. *Synroc* titanat telah dikembangkan di Australia, Amerika Serikat, Inggris, dan Jepang. *Synroc* ini dipilih karena kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk imobilisasi (mengungkung) semua unsur-unsur radioaktif dalam





LCRRT. Proses pembuatan *synroc* yang merupakan proses imobilisasi limbah dilakukan dengan cara mencampurkan limbah dalam larutan asam nitrat dengan *precursor* oksida, kemudian campuran tersebut dikeringkan, dikalsinasi dan dipres-panas dibawah kondisi reduksi pada temperatur sekitar 1200 °C untuk membentuk suatu keramik multi-fase yang padat (Ringwood, A.E., et.al., 1988). Komposisi *precursor* oksida (dalam % berat) adalah : Al₂O₃ (5,4); BaO (5,6); CaO (11,0); TiO₂ (71,4) dan ZrO₂ (6,6). Fase-fase mineral utama dalam *synroc* adalah: *Hollandite* [Ba(Al,Ti)₂Ti₆O₁₆], *Zirconolite* (CaZrTi₂O₇), dan *Perovskite* (CaTiO₃), selain itu terdapat fase titan-oksida dan fase-fase paduan (*alloy phases*) dalam jumlah lebih kecil. Pembentukan fase-fase utama mineral *synroc* terjadi pada suhu tinggi sekitar 1200 °C dengan reaksi :



Sebagaimana tujuan awal pengembangan *synroc*, maka telah dikembangkan *synroc-C* (*synroc* standar) untuk imobilisasi LCRRT tipe *Purex* (*Plutonium-Uranium Extraction*) yang ditimbulkan dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas, dimana fase *zirconolite* merupakan fase utama untuk mengikat unsur-unsur aktinida masuk dalam kisi-kisi fase tersebut. Fase-fase mineral penyusun *synroc-C* yang mengandung 20 % berat limbah radioaktif tingkat tinggi (LRTT) dan radionuklida dalam kisi-kisi berbagai fase mineral ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Fase Mineral *Synroc-C* yang Mengandung 20% berat LRTT (Vance, E.R., 1999).

Fase Mineral	% Berat	Radionuklida dalam Kisi Fase Mineral
- <i>Hollandite</i> , Ba(Al,Ti) ₂ Ti ₆ O ₁₆	30	- Cs dan Rb.
- <i>Zirconolite</i> , CaZrTi ₂ O ₇	30	-Logam tanah jarang dan aktinida.
- <i>Perovskite</i> , CaTiO ₃	20	- Sr, logam tanah jarang, dan aktinida.
- Titan Oksida	10	
- Fase paduan	5	-Tc,Pd, Rh, Ru, dll.
- Fase oksida lain	5	

Pada pengembangan *synroc* terbentuk pula beberapa fase lain yang terbentuk dari turunan fase utama (*Zirconolite*, *Perovskite*, dan *Hollandite*) dengan unsur-unsur yang lain yang terkandung dalam limbah, berturut-turut yaitu : *pyrochlore* (CaATi₂O₇, A = Gd, Hf, Pu, dan U), *brannerite* (AnTi₂O₆, An = aktinida), dan *freudenbergite* (Na₂Fe₂Ti₆O₁₆) (Levins, D.M and Jostsons, A., 1996; Vance, E.R., 1999).

Pembuatan blok *synroc* titanat limbah telah dikembangkan oleh ANSTO (Australia) yang menggunakan proses pres-panas isostatik pada suhu tinggi (1200 °C) menghasilkan blok *synroc* dengan densitas sekitar antara 2,1-3,4 g/cm³, yaitu tergantung jenis limbah dan tingkat muat limbah (*waste loading*) (Levins, D.M and Jostsons, A.). *Synroc* titanat mampu mengungkung lebih kuat untuk unsur radioaktif dengan nomor massa yang lebih tinggi (seperti uranium) dibanding dengan unsur-unsur ringan. Laju pelindihan untuk uranium dari blok *synroc* limbah adalah sangat rendah, pada hari pertama sekitar 5,0 x 10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹, kemudian dengan cepat turun dalam beberapa hari (10-30 hari) pertama dan secara *asymptotic* turun menuju suatu harga minimum sekitar 5,0 x 10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ (Ringwood, A.E, dkk, 1981). Berdasar kemampuan tersebut maka pada perkembangan terakhir *synroc* titanat sangat baik digunakan untuk imobilisasi limbah yang mengandung uranium seperti yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Berdasar fase mineral yang terbentuk, uranium yang terkandung dalam limbah akan terperangkap dalam fase *zirconolite*, *perovskite*, *pyrochlore* dan *brannerite* (Begg, et.al., 2005 ; Lumpkin, G.R., dkk., 1994). Berdasar data pengembangan *synroc* dari berbagai jenis limbah, ANSTO (Australia) juga telah mengembangkan *synroc* untuk imobilisasi limbah dari produksi ⁹⁹Mo. Dari pengembangan ini diperoleh *synroc* yang mengandung sampai 44 % berat limbah *calcine* (hasil solidifikasi limbah cair dari produksi ⁹⁹Mo) dengan kualitas sangat bagus sebanding dengan *synroc* standar (*Synroc-C*) (Levins, D.M., 1997). Arah perkembangan selanjutnya, *synroc* tidak hanya digunakan untuk imobilisasi LCRRT dari olah-ulang bahan bakar nuklir bekas, tetapi juga dikembangkan untuk limbah cair radioaktif tingkat sedang (LCRTS) umur panjang yang mengandung uranium (U), thorium (Th) dan/atau aktinida/TRU pemancar α (alfa) termasuk limbah yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo karena pertimbangan keselamatan digolongkan dalam LCRRT dengan penyimpanan lestari pada formasi tanah dalam.

Teknologi imobilisasi limbah dengan bahan matriks *synroc* telah dikembangkan melalui proses pres-panas isostatik menggunakan alat pres-panas suhu tinggi. Salah satu alternatif proses lain adalah melalui proses sintering pada suhu tinggi (tanpa alat pres-panas), proses ini telah dipelajari di *Lawrence Livermore National Laboratory* (Levins, D.M and Jostsons, A.). Pada penelitian ini dipelajari imobilisasi LCRTS dari produksi ⁹⁹Mo dengan bahan matriks *synroc* titanat melalui proses sintering pada suhu tinggi (pada suhu 1000-1300 °C selama waktu 1 - 4 jam). Kualitas hasil imobilisasi (dengan tingkat muat 10 – 60 % berat) ditentukan dengan melakukan uji karakteristik yang meliputi ujidensitas, uji kuat tekan, dan laju pelindihan.





Komponen utama LCRTS dari produksi ^{99}Mo adalah radionuklida hasil belah, uranium sisa dan sejumlah kecil TRU. Ada sekitar 500 radio nuklida hasil belah yang dihasilkan dalam reaksi pembelahan inti dalam rentang unsur radionuklida dari ^{30}Zn sampai ^{65}Tb (massa antara 76-160). Namun, hanya ada sekitar 200 radionuklida yang mudah terdeteksi dan sekitar 36 radionuklida yang memiliki *yield* lebih besar dari 1 %. Radionuklida utama hasil belah dari U^{235} yang mempunyai umur paruh ($T_{1/2}$) panjang dan *yield* tinggi adalah ^{99}Tc ($T_{1/2}=2,1 \times 10^5$ tahun, pemancar β energi rendah 294 keV), ^{137}Cs ($T_{1/2}=30,17$ tahun, pemancar γ energi sedang 546 keV) dan ^{90}Sr ($T_{1/2}= 28,8$ tahun, pemancar β murni energi tinggi 1,17 MeV) (Thiele, R.W., 1979). Dari ketiga radionuklida ini yang memberikan kontribusi terbesar terhadap aktivitas LCRTS adalah ^{137}Cs dan ^{90}Sr . Berdasarkan data tersebut, dalam penelitian ini diamati laju pelindihan U, Cs dan Sr serta laju pelindihan total untuk menentukan kualitas blok *synroc*.

Metode Penelitian

Bahan

Bahan yang digunakan adalah bahan matriks *synroc* standard yaitu Al_2O_3 , BaO , CaO , TiO_2 , ZrO_2 . Bahan limbah simulasi yaitu $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, CsCl , $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dan RuCl_3 . Bahan pendukung yaitu uranil nitrat heksa hidrat (UNH) HNO_3 , NaOH , HCl dan KCl (semua bahan buatan E. Merk, kualitas p.a.) serta aquades.

Peralatan

Alat yang digunakan adalah : alat cetak blok limbah, alat rolling *Gardco LabMill 8000*, jangka sorong *Krisbow Digital*, oven *Labtech LDO-080F*, alat uji tekan *Carver Hydraulic Unit model #3012*, alat ekstraksi (*Soxhlet*) *Iwaki*, *Furnace Vulcan A-550 1500°C*, Spektrofotometer UV-VIS *Lambda 35 Perkin Elmer* dan Spektrofotometer Serapan Atom *Aanalist 400 Perkin Elmer*, dan alat-alat gelas laboratorium.

Prosedur penelitian

a). Pembuatan sampel limbah simulasi yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo

Dibuat limbah cair radioaktif tingkat sedang (LCRTS) simulasi dengan melarutkan garam-garam UNH, CsCl , $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$, $\text{CdCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$, $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, dan RuCl_3 dengan pelarut HNO_3 1 N dalam labu ukur 1000 ml, sehingga diperoleh LCRTS simulasi yang mengandung U = 4.000 ppm, Cs = 2000 ppm, Sr = 2000 ppm, Cd = 500 ppm, Ce = 500 ppm, Co = 500 ppm, Ba = 500 ppm, Ru = 500 ppm.

b) Pembuatan blok *synroc* limbah variasi suhu dan waktu sintering serta tingkat muat limbah

Bahan prekursor oksida yang terdiri dari (dalam % berat) : Al_2O_3 (5,4), BaO (5,6), CaO (11,0), TiO_2 (71,4), ZrO_2 (6,6) dicampur sebagai bahan matriks *synroc*. Untuk tingkat muat limbah 30 % berat, dicampur 3,5 g bahan matriks *synroc* dengan 3 ml limbah simulasi (setara 1,5 g limbah kering) dan diaduk hingga homogen. Campuran tersebut dikeringkan pada suhu 100 °C, kemudian dikalsinasi dalam *furnace* pada suhu 750 °C. Serbuk hasil kalsinasi lalu dicetak dan dipres dalam cetakan berbentuk silindris, hasil cetakan dilepas dari cetakan kemudian dilakukan proses sintering dengan variasi suhu (1000 -1300 °C, waktu 3 jam), kemudian diulangi untuk variasi waktu sintering (1-4 jam, pada suhu optimum). Percobaan diulang untuk variasi tingkat muat limbah 10 – 60 % berat pada suhu dan waktu sintering optimum. Masing-masing blok limbah hasil proses imobilisasi dilakukan pengujian densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan total, serta laju pelindihan U, Cs, dan Sr, sehingga diperoleh proses sintering yang optimum untuk mendapatkan kualitas blok *synroc* limbah yang terbaik.

c) Pengujian blok *synroc* limbah

Pengujian densitas blok *synroc* limbah dilakukan dengan menentukan berat (dengan penimbangan) dan volume (dengan mengukur tinggi dan diameter) sampel blok limbah. Pengujian kuat tekan dilakukan dengan alat uji tekan. Pengujian laju pelindihan blok limbah dilakukan menurut *Japan Industrial Standard (JIS)*, yaitu laju pelindihan dipercepat dalam medium air (Martono, H., 1988). Metode penentuan laju pelindihan ini sama seperti yang dikembangkan oleh IAEA (Ringwood, A.E., dkk., 1981; Hesse, E.D., 1971). Blok limbah dimasukkan dalam basket dan dipasang pada alat *soxhlet* untuk direfluks dengan air suling pada suhu 100 °C dan tekanan 1 atmosfer selama 6 jam. Pengurangan berat sampel blok *synroc* limbah sebelum dan sesudah pelindihan ditentukan untuk menentukan laju pelindihan total. Selanjutnya konsentrasi uranium dalam air pelindih ditentukan dengan metode Spektrofotometri UV-VIS untuk mengetahui jumlah uranium (U) yang terlindih, sedang konsentrasi Cs dan Sr ditentukan dengan metode Spektrofotometri serapan atom. Laju pelindihan total dan laju pelindihan U, Cs, dan Sr dalam blok *synroc* limbah dihitung dengan persamaan :

$$L = (W_0 - W_t) / (A \cdot t) \quad (4)$$

L adalah laju pelindihan ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hari}^{-1}$), W_0 = berat sampel mula-mula (g), W_t = berat sampel setelah dilindih selama t hari (g), A = luas permukaan sampel (cm^2), dan t = waktu pelindihan (hari). Untuk laju pelindihan U, Cs, dan Sr, maka $W_0 - W_t$ = jumlah U, Cs, dan Sr yang terlindih dalam air pelindih selama waktu pelindihan (g). Laju pelindihan



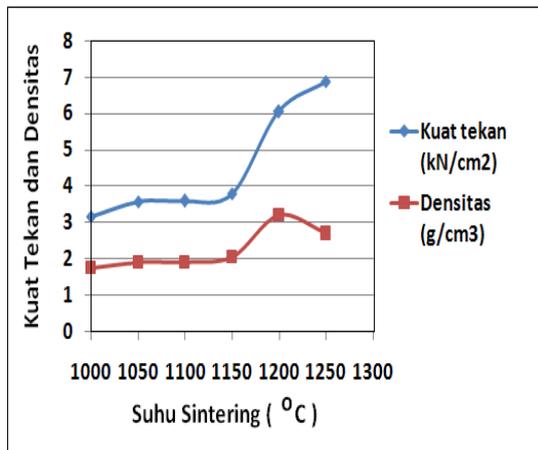
total tidak hanya penjumlahan laju pelindihan U, Cs, dan Sr saja, tetapi merupakan laju pelindihan semua komponen dari blok *synroc* yang meliputi unsur-unsur dalam limbah termasuk bahan prekursor (matriks) *synroc*.

Hasil dan Pembahasan

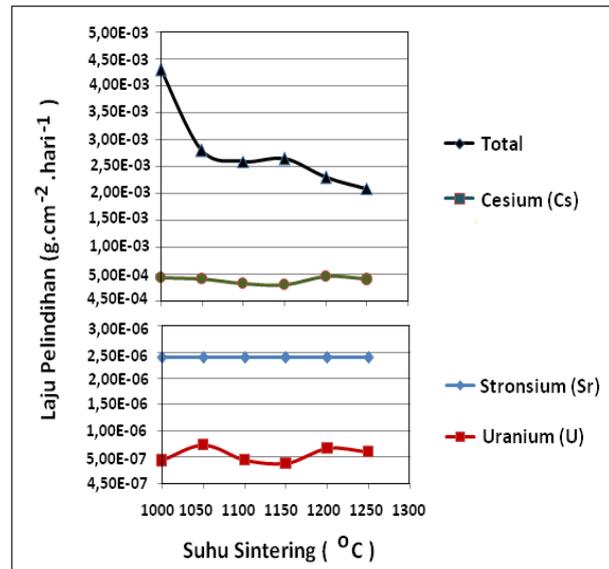
Proses imobilisasi dilakukan dengan mencampur limbah simulasi dengan bahan matriks *synroc*, dikeringkan, dikalsinasi pada suhu 750 °C, dicetak dan disintering untuk membentuk blok *synroc* yang padat dan kuat. Pembentukan blok *synroc* dilakukan dengan tiga parameter yaitu parameter suhu sintering, waktu sintering dan tingkat muat limbah (*waste loading*). Kualitas blok *synroc* limbah hasil imobilisasi untuk ketiga parameter tersebut dilakukan pengujian densitas, kuat tekan dan laju pelindihan.

Parametersuhu sintering

Hasil pengukuran densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan pada sampel blok *synroc* limbah dengan tingkat muat limbah 30 % berat dan waktu sintering 2,5 jam untuk variasi suhu 1000-1300 °C ditunjukkan pada Gambar 1 dan 2. Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu sintering maka densitas blok *synroc* limbah semakin meningkat. Pembentukan fase-fase mineral *synroc* pada persamaan (1), (2) dan (3) diperlukan suhu tinggi, makin tinggi suhu sintering maka makin sempurna terbentuknya fase-fase mineral *synroc*. Energi panas yang diberikan semakin besar menyebabkan terjadinya proses difusi dengan pembentukan fase-fase mineral *synroc* semakin cepat. Secara umum, dengan meningkatnya suhu terjadi penyusutan volume blok *synroc* (kestabilan fisik blok meningkat), maka juga akan meningkatkan kekuatan dan densitas blok *synroc* (Bao, W., dkk, 2002).



Gambar 1. Pengaruh suhu sintering terhadap kuat tekan dan densitas blok *synroc* limbah hasil imobilisasi.



Gambar 2. Pengaruh suhu sintering terhadap laju pelindihan blok *synroc* limbah hasil imobilisasi.

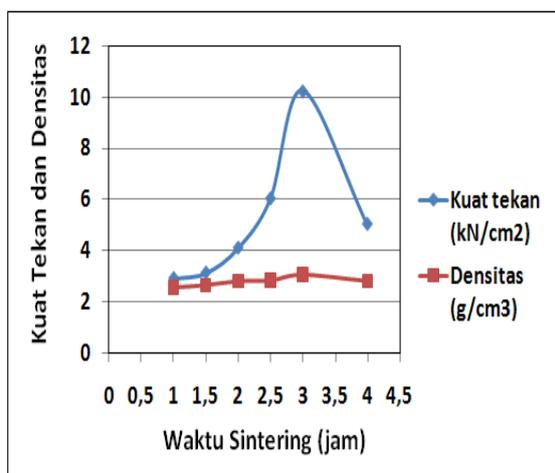
Proses sintering pada suhu tinggi dapat mengurangi pori-pori pada blok dan menumbuhkan serta mengatur butir-butir fase mineral *synroc* sehingga meningkatkan densitas dari blok *synroc*. Densitas optimum blok *synroc* limbah diperoleh pada suhu sintering 1200 °C sebesar 3,21 g/cm³. Pada suhu 1250 °C terjadi penurunan densitas blok *synroc* limbah, hal ini dapat disebabkan pada suhu sintering tersebut terjadi proses reduksi dari oksida logam menjadi logam pada suhu tinggi dan kemudian membentuk fase paduan logam yang lebih bebas yang dapat mengakibatkan meningkatkan volume blok dan menurunkan densitas.

Kuat tekan blok *synroc* limbah pada Gambar 1 terlihat bahwa semakin tinggi suhu sintering yang digunakan maka semakin besar kuat tekan blok *synroc* limbah, hal ini karena semakin tinggi suhu maka pembentukan fase-fase *synroc* semakin sempurna sehingga kestabilan kimia dan fisika dari blok yang terbentuk semakin kokoh sehingga menghasilkan kekuatan tekan yang semakin besar. Nilai kuat tekan optimum terdapat pada suhu 1250°C sebesar 6,87 kN/cm². Nilai kuat tekan tersebut memenuhi bahkan lebih tinggi dari standard yang ditetapkan IAEA yaitu sebesar 2-5 kN/cm² (IAEA, 1997). Hasil pengukuran laju pelindihan setiap blok *synroc* ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai laju pelindihan pada blok *synroc* merupakan nilai kemampuan blok *synroc* limbah terhadap pelarutan oleh air, sehingga semakin kecil nilai laju pelindihan maka semakin baik kualitas blok *synroc* limbah. Pada Gambar 2, laju pelindihan U < Sr < Cs berturut-turut nilainya (dalam g.cm⁻².hari⁻¹) berorde 10⁻⁷, 10⁻⁶, dan 10⁻⁴, sedang laju

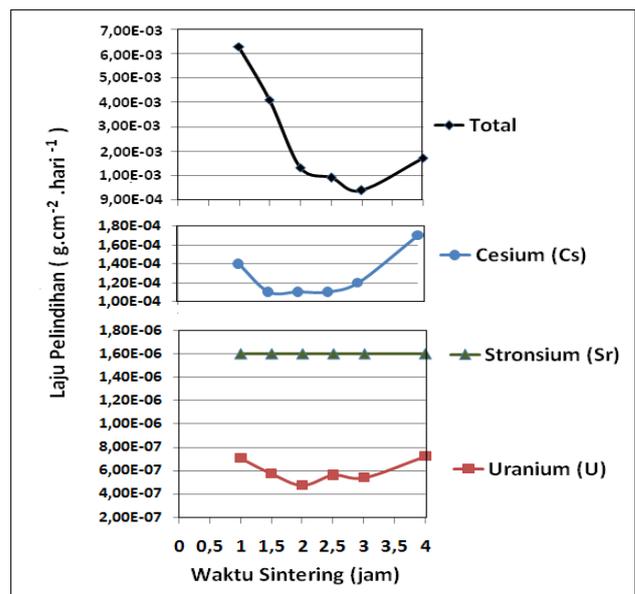
pelindihan total berorde $10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Hal ini menunjukkan bahwa blok *synroc* limbah sangat baik untuk mengungkung uranium yang merupakan unsur berat yang tidak hanya terperangkap tetapi merupakan penyusun fase turunan mineral *synroc*. Pada Gambar 2, semakin tinggi suhu sintering maka laju pelindihan total dari blok *synroc* semakin menurun. Hal itu disebabkan semakin tinggi suhu sintering maka semakin kuat pula pembentukan blok *synroc* dan semakin berkurang pori-pori yang terdapat pada dinding blok sehingga laju pelindihan semakin turun. Dari kurva tersebut diperoleh pelindihan total minimum pada suhu $1250 \text{ }^\circ\text{C}$, walaupun demikian pada suhu 1100 sampai $1250 \text{ }^\circ\text{C}$ tidak memberikan perbedaan yang berarti yang nilainya antara $2,1 \times 10^{-3} - 2,6 \times 10^{-3} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Laju pelindihan Cs terendah terdapat pada suhu $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ sebesar $3,1 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Hal tersebut menunjukkan bahwa pada suhu tersebut kondisi blok *synroc* yang terbentuk cukup baik untuk menjerap unsur Cs sehingga blok yang terlindih berada dibawah standar yang ditetapkan IAEA yaitu sebesar $8,5 \cdot 10^{-4} \text{ g/cm}^2.\text{hari}$. Kemudian laju pelindihan Cs meningkat seiring dengan meningkatnya suhu sintering. Hal tersebut karena Cs bersifat volatil dan mudah lepas dari kisi-kisi blok seiring dengan meningkatnya suhu, walaupun demikian nilai laju pelindihan Cs dengan variasi suhu sintering tidak memberikan perbedaan yang berarti. Untuk laju pelindihan Sr, menunjukkan nilai yang sangat rendah (orde $10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$) dan tidak dipengaruhi oleh suhu sintering. Laju pelindihan Sr rata-rata bernilai $2,4 \times 10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ yang menunjukkan bahwa *synroc* dapat sebagai matriks untuk imobilisasi Sr karena tingginya kapasitas muatan Sr yang terperangkap dalam fase *perovskite* pada blok *synroc* sehingga laju pelindihannya sangat rendah (Bao, W., dkk, 2002). Untuk laju pelindihan U adalah sangat rendah yaitu antara $3,9 \times 10^{-7} - 7,4 \times 10^{-7} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ (tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam orde sangat rendah) dan optimum pada suhu $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ sebesar $3,9 \cdot 10^{-7} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Laju pelindihan U, Sr, dan Cs pada blok *synroc* sangat rendah dan pada parameter suhu sintering tidak menunjukkan perubahan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa blok *synroc* memiliki ketahanan yang cukup tinggi terhadap fase air. Berdasarkan pertimbangan hasil pengujian densitas, kuat tekan, laju pelindihan total, laju pelindihan U, Cs, dan Sr pada blok *synroc* tersebut di atas, maka suhu sintering terbaik (optimum) adalah pada $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Kondisi suhu sintering terbaik ini digunakan dalam percobaan untuk parameter waktu sintering dan tingkat muat limbah.

Parameter waktu sintering

Pada penentuan waktu sintering optimum, variasi waktu yang digunakan berkisar antara 1-4 jam pada suhu sintering optimum yaitu $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ dan tingkat muat limbah 30 % berat. Hasil pengukuran densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan untuk tiap blok *synroc* limbah ditunjukkan pada Gambar 3 dan Gambar 4.



Gambar 3. Pengaruh waktu sintering terhadap densitas dan kuat tekan blok *synroc* limbah hasil imobilisasi.



Gambar 4. Pengaruh waktu sintering terhadap laju pelindihan total, laju pelindihan U, Sr, dan Cs dari blok *synroc* hasil imobilisasi.

Pada Gambar 3 ditunjukkan bahwa semakin lama waktu sintering maka semakin tinggi densitas blok *synroc* limbah yang terbentuk. Kenaikan densitas terjadi karena pada saat proses sintering terjadi proses difusi dan pertumbuhan butir antar fase-fase menuju susunan multifase yang kompak dan padat sehingga pori-pori diantara butir dapat berkurang dan terjadi penyusutan volume sehingga densitasnya meningkat (Ristic, R.I., dkk., 1990). Densitas optimum terjadi pada waktu sintering 3 jam dengan nilai $3,06 \text{ g/cm}^3$. Kurva kuat tekan pada Gambar 3

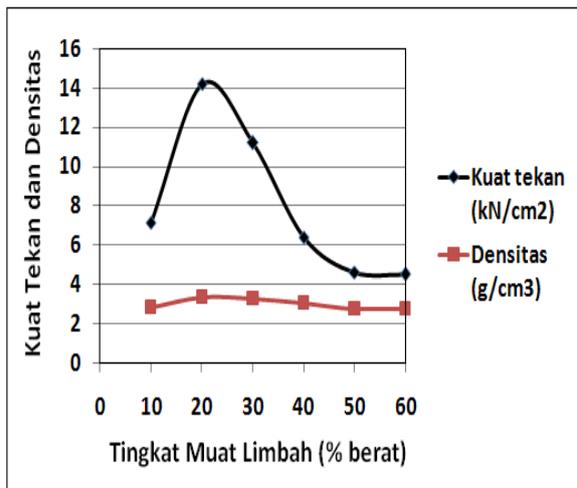
menunjukkan bahwa semakin lama waktu sintering maka semakin besar kuat tekan blok *synroc* yang dihasilkan, hal ini sesuai dengan fenomena terhadap perubahan densitas blok *synroc* limbah. Kuat tekan optimum ditunjukkan pada waktu sintering 3 jam dengan nilai $10,24 \text{ kN/cm}^2$.

Hasil pengujian laju pelindihan blok *synroc* limbah (Gambar 4) menunjukkan bahwa laju pelindihan $U < Sr < Cs$ sesuai dengan fenomena pada parameter suhu sintering (seperti pada Gambar 2). Laju pelindihan total blok *synroc* limbah optimum (nilai terendah) ditunjukkan pada waktu sintering 3 jam sebesar $3,7 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ yang menunjukkan bahwa dengan waktu tersebut pembentukan fase-fase mineral dalam blok *synroc* telah sempurna. Selanjutnya ada peningkatan nilai laju pelindihan pada waktu sintering 4 jam yang diakibatkan semakin lama waktu sintering maka kemungkinan lepasnya unsur yang bersifat volatil seperti Cs dari blok *synroc* lebih mudah. Selain itu, terbentuknya fase paduan logam dari Cs memudahkan pelepasan Cs ke dalam fase air sehingga meningkatkan nilai laju pelindihan. Nilai laju pelindihan Cs terendah dicapai pada waktu sintering antara 1,5 – 3,0 jam yaitu antara $1,07 \times 10^{-4} - 1,20 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Laju pelindihan Sr dan U, menunjukkan bahwa semua blok mempunyai nilai yang sangat rendah (orde 10^{-6} dan $10^{-7} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$) seperti ditunjukkan pada parameter suhu sintering (Gambar 2). Laju pelindihan Sr dan U relatif tidak mempunyai perbedaan yang berarti. Laju pelindihan rata-rata untuk Sr bernilai $2,4 \times 10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ dan untuk U antara $4,7 \times 10^{-7} - 8,4 \times 10^{-7} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Nilai tersebut diperkuat bahwa laju pelindihan unsur-unsur valensi satu dan dua seperti Cs dan Sr dalam *synroc* adalah 500 sampai 2000 kali lebih kecil daripada gelas borosilikat, sedang untuk unsur-unsur multivalen seperti U dalam *synroc* lebih kecil 10.000 kali daripada dalam gelas borosilikat, sehingga blok *synroc* sangat baik digunakan untuk mengimobilisasi unsur-unsur tersebut dan lebih lagi untuk aktinida pemancar alfa umur panjang (Ringwood, A.E, dkk, 1981; Oversby, V.M. and Ringwood, A.E., 1980).

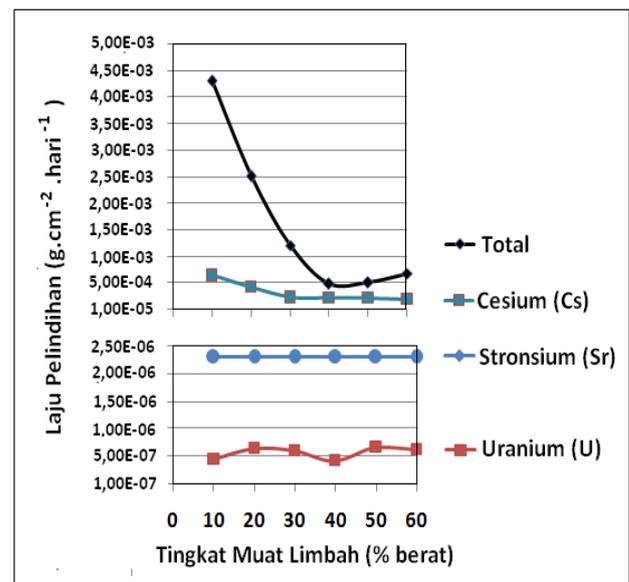
Berdasarkan pertimbangan data uji densitas, kuat tekan, laju pelindihan total, dan laju pelindihan U, Cs, dan Sr pada blok *synroc* limbah tersebut dia atas maka waktu sintering terbaik (optimum) adalah 3 jam yang kemudian digunakan dalam penentuan tingkat muat limbah optimum.

Parameter tingkat muat limbah (waste loading)

Pada penentuan tingkat muat limbah yang optimum dalam pembuatan blok *synroc*, digunakan suhu sintering optimum yaitu $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ dan waktu sintering optimum yaitu 3 jam. Variasi tingkat muat limbah berkisar antara 10-60 % berat. Hasil pengukuran densitas, kuat tekan, dan laju pelindihan blok *synroc* limbah dengan variasi tingkat muat limbah ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6.



Gambar 5. Pengaruh tingkat muat limbah terhadap densitas dan kuat tekan blok *synroc* limbah hasil imobilisasi.



Gambar 6. Pengaruh tingkat muat limbah terhadap laju pelindihan blok *synroc* limbah hasil imobilisasi.

Pada Gambar 5, densitas optimum ditunjukkan pada tingkat muat limbah sebesar 20 % yaitu $3,35 \text{ g/cm}^3$ dan semakin menurun dengan bertambahnya tingkat muat limbah. Dalam hal ini, matriks *synroc* yang berperan sebagai pengikat limbah akan mengalami suatu batas kejenuhan. Ketika batas tersebut terlampaui, maka sebagian limbah tidak berikatan dengan fase-fase *synroc* sehingga membentuk fase paduan yang bersifat lebih bebas dan dapat mengurangi pembentukan suatu monolit multifase yang kompak bila limbah melebihi batastatik optimum. Sehingga mengakibatkan menurunnya densitas blok *synroc* limbah.



Dari kurva kuat tekan blok *synroc* limbah (Gambar 5) terlihat bahwa tingkat muat limbah yang paling optimum adalah pada nilai 20 % berat yaitu dengan nilai kuat tekan 14,18 kN/cm². Pada tingkat muat limbah 30 % berat memberikan nilai kuat tekan sebesar 11,18 kN/cm² yang berada diatas nilai kuat tekan yang ditetapkan IAEA. Komposisi limbah memiliki pengaruh terhadap stabilitas kimia blok *synroc* limbah, stabilitas kimia dari blok *synroc* akan semakin berkurang dengan meningkatnya jumlah limbah (Bao, W., dkk, 2002). Penambahan prekursor *synroc* (matriks) ke dalam limbah akan membentuk fase-fase yang sesuai dengan komposisi unsur yang terdapat pada limbah dan membentuk monolit multifase yang padat dan kompak. Fase yang terbentuk tersebut bersifat saling menguatkan sehingga dapat meningkatkan kuat tekan blok *synroc* yang terbentuk. Sedangkan pengurangan kuat tekan pada blok *synroc* terjadi karena semakin bertambahnya muatan limbah yang tidak sebanding dengan jumlah prekursor *synroc* pembentuk fase-fase yang semakin berkurang karena mengalami kejenuhan.

Hasil pengujian laju pelindihan untuk setiap blok *synroc* limbah (Gambar 6) menunjukkan bahwa laju pelindihan U < Sr < Cs yang berturut-turut nilainya (dalam g.cm⁻².hari⁻¹) berorde 10⁻⁷, 10⁻⁶, dan 10⁻⁴, sedang laju pelindihan total berorde 10⁻³ g.cm⁻².hari⁻¹ (seperti pada Gambar 2 dan Gambar 4). Pada Gambar 6, terlihat bahwa semakin tinggi tingkat muat limbah maka laju pelindihan total semakin menurun hingga mencapai tingkat muat limbah optimum yang terdapat pada tingkat muat limbah sebesar 40 % berat yaitu 1,7x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹. Penurunan laju pelindihan tersebut karena semakin banyak terbentuknya fase-fase turunan mineral *synroc* yang lebih kuat mengikat dan mengungkung unsur-unsur limbah seperti U, Cs, dan Sr. Selanjutnya laju pelindihan mengalami kenaikan tetapi tidak begitu signifikan, hal ini disebabkan jumlah prekursor oksida untuk pembentukan fase mineral *synroc* semakin berkurang, sehingga ada sebagian unsur yang bebas tidak menjadi penyusun fase atau tidak terperangkap dalam kisi-kisi fase mineral *synroc*, akibatnya laju pelindihan total sedikit naik.

Fenomena serupa juga terjadi pada laju pelindihan Cs yang semakin menurun seiring dengan bertambahnya tingkat muat limbah. Hal tersebut membuktikan bahwa walaupun semakin banyak tingkat muat limbah yang ditambahkan ke dalam blok *synroc*, semakin baik pengungkungan Cs di dalam blok *synroc* sehingga laju pelindihan Cs semakin menurun. Pada tingkat muat limbah 30-60 % berat, laju pelindihan Cs relatif tetap walaupun sedikit turun nilainya antara 1,8.10⁻⁴ – 2,2x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹. Laju pelindihan U dan Sr, hasil yang ditunjukkan tidak jauh berbeda dengan parameter suhu dan waktu sintering. Laju pelindihan Sr tidak dipengaruhi oleh tingkat muat limbah sampai 60 % berat yaitu dengan nilai laju pelindihan Sr rata-rata 2,3x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹. Hal ini menunjukkan bahwa seiring dengan meningkatnya tingkat muat limbah, kapasitas pengungkungan muatan Sr di dalam blok *synroc* tetap tinggi sehingga Sr tidak terlepas dari kisi-kisi blok *synroc* dan nilai laju pelindihan Sr tetap rendah. Fenomena laju pelindihan U serupa dengan laju pelindihan Sr bahkan lebih rendah. Dengan bertambahnya tingkat muat limbah tidak menyebabkan perubahan laju pelindihan U yang signifikan dengan nilai antara 4,1x10⁻⁷-6,5x10⁻⁷ g.cm⁻².hari⁻¹.

Secara umum, fase-fase dalam *synroc* memberikan ketahanan kimia yang tinggi pada blok *synroc* yang terbentuk sehingga memberikan daya tahan yang kuat terhadap pelindihan oleh air. Selain itu, pada tingkat muat limbah yang rendah belum banyak terbentuk fase-fase turunan seperti *pyrochlore* dimana uranium berperan sebagai pembentuk fase sehingga unsur-unsur yang terkandung di dalam limbah seperti U, Sr, dan Cs hanya terperangkap di dalam kisi-kisi fase sehingga menyebabkan unsur tersebut relatif mudah lepas pada saat pelindihan. Sedangkan pada tingkat muat limbah yang tinggi (>30%) akan banyak terbentuk fase turunan yang menyebabkan pengungkungan unsur-unsur tersebut pada limbah lebih kuat dan menurunkan nilai laju pelindihan pada blok *synroc*.

Berdasarkan hasil uji karakteristik blok *synroc* limbah yaitu uji densitas, kuat tekan, laju pelindihan tersebut di atas, diperoleh suhu dan waktu sintering terbaik adalah pada 1200 °C selama 3 jam dan tingkat muat limbah 20 % berat (pada kuat tekan dan densitas paling tinggi), dengan nilai densitas blok *synroc* limbah 3,35 g/cm³, kuat tekan 14,18 kN/cm², laju pelindihan total 2,5x10⁻³ g.cm⁻².hari⁻¹, dan laju pelindihan Cs, Sr, dan U berturut-turut adalah 4,1x.10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹, 2,3x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹, dan 6,3x10⁻⁷ g.cm⁻².hari⁻¹. Hanya saja berdasarkan efisiensi bahan dan limbah yang masih dalam batas persyaratan IAEA maka dapat digunakan tingkat muat limbah sampai 40 % karena nilai kuat tekan dan densitas blok *synroc* limbah telah memenuhi standar beton limbah yang ditetapkan IAEA dengan kuat tekan 2-5 kN/cm², begitu pula pada tingkat muat 10-60 % nilai densitasnya cukup tinggi yaitu 2,7 -3,3 g/cm³. Semua blok *synroc* dengan proses sintering menunjukkan nilai densitas sesuai dengan hasil pembentukan *synroc* dengan proses pres-panas isostatik yaitu antara 2,1-3,4 g/cm³ (Levins, D.M and Jostsons, A.). Sedang laju pelindihannya juga sangat memenuhi persyaratan IAEA yaitu 1,7x10⁻¹ - 2,5x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹ (IAEA, 1997). Kualitas hasil blok *synroc* titanat limbah dengan proses sintering ini sesuai dengan kualitas hasil blok limbah *synroc* titanat dengan proses pres-panas isostatik.

Kesimpulan

Proses imobilisasi limbah cair radioaktif simulasi yang ditimbulkan dari kegiatan produksi radioisotop ⁹⁹Mo (dari iradiasi target uranium oksida) yang mengandung unsur-unsur hasil belah, uranium dan transuranium (aktinida) minor menggunakan matriks *synroc* titanat dengan proses sintering suhu tinggi diperoleh suhu dan waktu sintering terbaik pada 1200 °C selama 3 jam. Pada kondisi tersebut diperoleh tingkat muat limbah optimum adalah 20 % berat, dengan nilai densitas blok *synroc* limbah 3,35 g/cm³, kuat tekan 14,18 kN/cm², laju pelindihan total 2,5x10⁻³





$\text{g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$, dan laju pelindihan untuk $U = 6,3 \times 10^{-7} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$, $Cs = 4,1 \times 10^{-4} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$, dan untuk $Sr = 2,3 \times 10^{-6} \text{ g.cm}^{-2}.\text{hari}^{-1}$. Berdasar persyaratan IAEA dan pertimbangan efisiensi maka masih dapat digunakan untuk tingkat muat limbah sampai 40 % berat. Kualitas hasil blok *synroc* titanat limbah dengan proses sintering ini sesuai dengan kualitas hasil blok *synroc* titanat dengan proses pres-panas isostatik dan memenuhi kualitas blok limbah yang direkomendasikan oleh IAEA. Bahan matriks *synroc* titanat dengan proses sintering suhu tinggi sebagai alternatif pengganti proses pres-panas isostatik berhasil sangat baik untuk imobilisasi limbah cair radioaktif umur panjang yang mengandung U, Cs, dan Sr, yang ditimbulkan dari produksi radioisotop ^{99}Mo .

Daftar Pustaka

- Aisyah, Herlan Martono, dan Mirawaty, Pengaruh Keasaman dan Kandungan Limbah pada Imobilisasi Limbah Trasuranium dari IRM dengan Polimer, Seminar Hasil Penelitian Dan Kegiatan P2PLR-BATAN Tahun 2003, Serpong, ISSN 0852-2979, 2004: 9-16.
- Bao, W., Xu, S., Li, L., Song, C., Zhang, J., Zhu, Y., Solidification of Sr-Containing Stripping Solutions in Titanate Ceramics. *Journal of Nuclear Material* 2002, p. 237-241.
- Begg, et.al., Low-risk Waste Forms to Lock-up High-Level Nuclear Waste, Proceeding of the Symposium on Waste Management-2005 (WM'05), Tucson-Arizona, 2005.
- Hespe, ED., Leach Testing Of Immobilized Waste Solids, A Proposal For A Standar Method, *Atomic Energy Review* 1971; 9: 1-12.
- IAEA, Characterization of Radioactive Waste Form and Packages, International Atomic Energy Agency, Vienna, Technical Report Series No. 383, 1997.
- IAEA, Management of Radioactive Waste From ^{99}Mo Production, International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA-TECDOC 515, 1998.
- Levins, DM., ANSTO's Waste Management Action Plan, Third Seminar on Radioactive Waste Management, Regional Nuclear Cooperation in Asia, Beijing-China, 10-16 November 1997.
- Lumpkin, GR., Hart, KP., Mcglinn P.J., Payne T.E., Giere R., and Williams C.T., Retention of Actinides in Natural Pyrochlores and Zirconolites, *Radiochemica Acta*, Vol. 66/67, 469, 1994.
- Martono, H dan Aisyah, Efek Radiasi Terhadap Gelas Limbah Hasil Vitrifikasi, Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Iptek Nuklir, P3TM-BATAN, Yogyakarta, 2002, p.162-170.
- Martono, H dan Widiatmo, Perancangan Melter Untuk Pengolahan Limbah Cair Aktivitas Tinggi Secara Vitrifikasi, Seminar Hasil Penelitian Dan Kegiatan P2PLR-BATAN 2001, Serpong, 2002, p.9-19.
- Martono H., Characterization of Waste Glass and Treatment of High Level Liquid Waste, Training Report on Treatment of HLLW and Characterization of Waste Glass at Tokai Works, PNC, Japan, 1988.
- Oversby, VM. and Ringwood, A.E., "Leach testing of Synroc and glass samples at 85 °C and 200 °C", *Nuclear Chem. Waste Management*, 1980.
- Ringwood AE, Overby, VM., and Kesson, SE., Synroc: Leaching Performance and Process Technology, Proceedings of the International Seminar on Chemistry and Process Engineering for High Level Liquid Waste Solidification, Julich. 1981, p.495-506.
- Ringwood, AE., Kesson, SE., Reeve, KD., Levins, DM., and Ramm, EJ., Radioactive Wasteforms for the future, Amsterdam: (Eds W.Lutze and R.C.Ewing), Elsevier; 1988, p. 233-334.
- Ristic, RI., Sherwood, JN., and Sripathi, T., Train Variation of (100) Growth Sector of Potash Alum Single Crystals and its Relation of the Growth Rate Dispersion. *Journal of Crystal Growth* 1990, p. 245-248.
- Thiele, RW., Nuclear Technology and Its Applications, Training Course, BATAN Yogyakarta, 1979.
- Vance, ER., Jostsons, A., and Hart, KP., Synroc as a Ceramic Wasteform for Deep Geological Disposal, Int.Conf.on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Winnipeg, 1996.
- Vance, ER., Status of Synroc Ceramics for High Level Waste, Proceedings of The 2nd Bilingual International Workshop on HLLW Management, Dep.of Nuclear Engineering, Faculty of Engineering, Gadjah Mada University, Yogyakarta, 1999, p. 60-63.





Lembar Tanya Jawab
Moderator: Soepriyanto (ITS Surabaya)
Notulen : Putri Restu Dewati (UPN "Veteran" Yogyakarta)

1. Penanya : Meita Saraswati
Pertanyaan : Apakah MO sudah dioperasikan?
Jawaban : Sudah diaplikasikan di RS besar sejak tahun 1960 an. Sudah dipakai di RS Jakarta, Yogyakarta

2. Penanya : Suprianto (ITS Surabaya)
Pertanyaan : Laboratorium ada di mana? Di mana membuang limbah?
Jawaban : Lab ada di serpong kawasan Puspitek Gedung PLTR-BATAN Tangerang Selatan. Limbah disimpan dalam bentuk blok-blok synroc Limbah, disimpan di Fasilitas penyimpanan lestari.

