

PENGAJIAN BAHAN SYNROC UNTUK IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF DARI PRODUKSI RADIOISOTOP ^{99}MO

Gunandjar

Pusat Limbah Radioaktif (PLR) - BATAN
Kawasan Puspittek Serpong 15314, Tangerang

ABSTRAK

PENGAJIAN BAHAN SYNROC UNTUK IMOBILISASI LIMBAH RADIOAKTIF DARI PRODUKSI RADIOISOTOP ^{99}Mo . Dilakukan pengkajian pengembangan teknologi imobilisasi dengan bahan *synroc* untuk limbah radioaktif umur panjang yang ditimbulkan dari produksi radioisotop molibdenum-99 (^{99}Mo). *Synroc* adalah bentuk limbah kristalin yang tersusun dari gabungan fase-fase titanat yang stabil dan dipilih karena kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk imobilisasi semua unsur radioaktif dalam limbah radioaktif cair aktivitas tinggi (LCAT). Pengembangan komposisi *synroc* untuk imobilisasi limbah tergantung pada kandungan radionuklida. Untuk limbah radioaktif umur panjang yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo yang mengandung uranium, transuranium (TRU) dan unsur-unsur hasil belah telah dikembangkan *synroc* yang mengandung fase utama *pyrochlore* (CaATi_2O_7), *brannerite* (AnTi_2O_6) dan *hollandite* [$\text{Ba}(\text{Al,Ti})_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$] dengan penambahan unsur-unsur absorber neutron (Gd atau Hf) untuk mencegah kritikalitas. Semua studi ilmu pengetahuan dasar memberikan konfirmasi bahwa laju pelindihan dan kerusakan akibat radiasi peluruhan- α terhadap *synroc* relatif sangat rendah dan dapat diterima. Di Indonesia, adaptasi teknologi imobilisasi LCAT dengan bahan *synroc* dilakukan untuk imobilisasi limbah radioaktif umur panjang yang mengandung uranium, TRU dan hasil belah yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo .

Kata kunci : Pengelolaan limbah radioaktif, imobilisasi limbah radioaktif, limbah radioaktif aktivitas tinggi, *synroc*, limbah radioaktif dari produksi ^{99}Mo , penyimpanan lestari

ABSTRACT

ASSESSMENT OF SYNROC MATERIALS FOR IMMOBILIZATION OF RADIOACTIVE WASTES FROM ^{99}Mo RADIOISOTOPE PRODUCTION. The assessment of immobilization technology using *synroc* for the long life radioactive wastes generated from molybdenum-99 (^{99}Mo) radioisotope production was carried out. *Synroc* is a crystalline wastefrom comprising a stable assemblage of titanate phases chosen for their geochemical stability and collective ability to immobilize all the radioactive elements present in high level liquid radioactive wastes (HLLW). Development of *synroc* for waste immobilization depend on the containing of radionuclides. For the long life radioactive waste generated from ^{99}Mo production containing of uranium, transuranic (TRU) and fission products was developed the *synroc* containing of *pyrochlore* (CaATi_2O_7), *brannerite* (AnTi_2O_6), and *hollandite* [$\text{Ba}(\text{Al,Ti})_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$] as main host phases with neutron absorbers (Gd or Hf) were needed to suppress criticality potential. All basic science studies confirm that the leaching-rates and α -decay damage in *synroc* relatively very low and acceptable. In Indonesia, adaptation of HLLW immobilization technology using *synroc* materials was carried out for immobilization of the long life radioactive wastes containing of uranium, TRU and fission products generated from ^{99}Mo production.

Key word : Radioactive waste management, immobilization of radioactive waste, high level radioactive waste, *synroc*, radioactive waste from ^{99}Mo production, ultimate disposal

PENDAHULUAN

Pemanfaatan tenaga nuklir di bidang kesehatan (kedokteran nuklir) antara lain adalah pemanfaatan radioisotop untuk terapi dan diagnosis. Salah satu radioisotop yang secara luas digunakan dalam kedokteran nuklir untuk diagnosis adalah technesium-99m (^{99m}Tc). Radioisotop ini mempunyai umur paroh ($T_{1/2}$) sangat pendek yaitu hanya 6 jam, sehingga sangat sesuai untuk keperluan diagnosis.

Radioisotop ^{99m}Tc ini disediakan melalui peralatan *generator* yang mengandung radioisotop molibdenum-99 (^{99}Mo) yang menghasilkan ^{99m}Tc dari reaksi peluruhan :



Radioisotop ^{99}Mo diproduksi melalui jalur hasil belah (hasil fisi) dari bahan bakar uranium oksida yang

diperkaya dengan uranium-235 (^{235}U) yang diiradiasi di dalam reaktor. Iradiasi uranium oksida tersebut menghasilkan ^{99}Mo dan radionuklida hasil belah yang lain. Setelah ^{99}Mo dipisahkan maka timbul limbah radioaktif yang mengandung radionuklida dari unsur-unsur hasil belah dan aktinida atau transuranium (TRU) serta sisa uranium.

Di negara-negara maju di bidang nuklir, strategi pengelolaan limbah radioaktif cair umur panjang yang mengandung unsur-unsur hasil belah, uranium, dan aktinida atau TRU sebagaimana yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo , karena pertimbangan keselamatan dimasukkan dalam kategori limbah cair aktivitas tinggi (LCAT). Limbah tersebut diperlakukan sama dengan LCAT dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas dalam gelas borosilikat, yang diikuti dengan penyimpanan lestari pada formasi geologi tanah dalam (*Deep Geological Disposal Facility*). Strategi ini ternyata masih menghadapi masalah karena hasil penelitian para ahli geokimia bahwa limbah gelas borosilikat (hasil imobilisasi LCAT dengan teknik vitrifikasi) ternyata tidak stabil bila disimpan di dalam tanah akibat adanya pemanasan gamma (*gamma heating*) di dalam gelas dan perbedaan temperatur bumi (*geothermal gradient*) yang dapat menimbulkan temperatur 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 *overpack* (bungkus luar) dari tanah liat telah digunakan di dalam fasilitas penyimpanan lestari pada formasi geologi tanah dalam [1]. Dengan alasan tersebut maka dikembangkan bahan *synroc* sebagai alternatif yang lebih baik untuk imobilisasi LCAT. *Synroc* adalah suatu bahan imobilisasi limbah bentuk kristalin yang terdiri dari gabungan fase-fase kristal titanat yang stabil. *Synroc* ini dipilih karena kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk imobilisasi semua unsur-unsur radioaktif dalam LCAT [2]. Perkembangan selanjutnya, *synroc* tidak hanya digunakan untuk imobilisasi LCAT dari olah-ulang bahan bakar nuklir bekas, tetapi juga dikembangkan untuk limbah radioaktif cair aktivitas sedang (LCAS) umur panjang yang mengandung uranium (U), torium (Th) dan TRU/aktinida pemancar α termasuk limbah yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo yang karena pertimbangan keselamatan digolongkan dalam LCAT.

Di Indonesia, produksi radioisotop ^{99}Mo dilakukan di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR), sedang penelitian dan pengembangan teknologi pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN. Kedua fasilitas tersebut berada di Fasilitas Penelitian Tenaga Nuklir Kawasan Puspipstek Serpong, Banten. Program pengembangan teknologi pengelolaan limbah radioaktif yang ditimbulkan dari produksi radioisotop ^{99}Mo adalah merupakan program yang tidak terpisahkan dengan program pemanfaatan tenaga nuklir di bidang kesehatan

yang harus dilaksanakan melalui penelitian dan pengembangan, serta pengkajian yang mendalam sehingga diperoleh teknologi pengelolaan limbah radioaktif yang optimal. Beberapa teknologi imobilisasi limbah radioaktif menjadi kemasan limbah yang siap disimpan telah dikembangkan oleh negara-negara maju di bidang nuklir, yaitu teknologi sementasi, vitrifikasi, polimerisasi, bitumenasi, *superhigh temperature method (SHTM)*, *vitromet* dan *synroc*. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN telah menerapkan dengan mantap teknologi sementasi untuk imobilisasi limbah khususnya golongan limbah radioaktif aktivitas rendah (LAR) dan limbah radioaktif aktivitas sedang (LAS) umur paroh pendek ($T_{1/2} \leq 30$ tahun). Selanjutnya untuk mendukung program pemanfaatan tenaga nuklir di bidang kesehatan (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. 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 maupun yang akan datang.

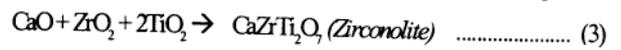
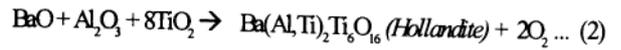
Mengingat pentingnya masalah tersebut, maka dalam makalah ini dikaji salah satu teknologi imobilisasi limbah radioaktif dengan bahan *synroc* sebagai alternatif untuk imobilisasi LCAT umur panjang dari produksi ^{99}Mo , menjadi kemasan limbah yang siap disimpan di fasilitas penyimpanan lestari. Pada bab-bab selanjutnya dalam makalah ini diuraikan, dianalisis dan dikaji tentang pengembangan teknologi imobilisasi limbah dengan *synroc* dan pembahasan teknologi imobilisasi limbah yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN, Indonesia.

ARAH PENGEMBANGAN IMOBILISASI LIMBAH DENGAN SYNROC

Pengembangan bahan untuk imobilisasi limbah cair aktivitas tinggi (LCAT) sebagai alternatif pengganti limbah gelas borosilikat pertama kali dikemukakan dengan ide dasar memasukkan limbah hasil belah dan aktinida ke dalam kisi-kisi kristal mineral sintetis yang telah diketahui mempunyai umur yang sangat panjang (beberapa juta tahun) di alam. Suatu contoh sebagai ilustrasi ditemukan *chemical zoning* dari mineral *zirconite* alam dalam umur 40 juta tahun yang ditemukan di Adamello Itali Utara, kristal tersebut mengandung : 2,7 % berat sampai dengan 17,1 % berat ThO_2 dan 0,7 % berat sampai dengan 6,0 % berat UO_2 dan telah dihitung dosis peluruhan α adalah $0,2 \times 10^{16} \alpha / \text{mg}$ sampai dengan $1,0 \times 10^{16} \alpha / \text{mg}$ yang ekuivalen dengan umur suatu *synroc* yang disimpan selama 10^5 tahun sampai 10^6 tahun[1]. Untuk pengembangan mineral sintetis,

sebagian besar mineral-mineral yang dipilih adalah : a) mineral silikat, yaitu *pollucite* (CsAlSi₂O₆) dan *Sr feldspar* (SrAl₂Si₂O₈); b) mineral fosfat, yaitu, monasit (*monazite*, CePO₄) dan *apatite* [Ca₅(PO₄)₃F]; dan c) mineral oksida (*fluorite-structured UO₂*). Selanjutnya dikembangkan mineral sintetis *supercalcines* yang merupakan campuran fase-fase mineral tersebut yang dibentuk melalui proses sintering pada temperatur ~ 1100 °C setelah alumina, fosfat dan silika ditambahkan ke dalam limbah hasil belah. Tingkat muat limbah dalam *supercalcines* ini cukup tinggi mencapai 70% berat [1].

Perkembangan selanjutnya pada tahun 1978, RINGWOOD [3] menemukan *synroc* yang merupakan gabungan mineral titanat yang jauh lebih tahan terhadap air dibanding dengan sederetan mineral-mineral *supercalcine*. Proses pembuatan *synroc* yang merupakan proses imobilisasi limbah dalam *synroc* dilakukan dengan cara mencampurkan limbah hasil belah atau aktinida 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 [4]. 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 sebagai berikut :



Sebagaimana tujuan awal pengembangan *synroc*, maka telah dikembangkan *synroc-C* yaitu jenis *synroc* yang dikembangkan untuk imobilisasi LCAT tipe *Purex* yang ditimbulkan dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas, dimana fase *zirconolite* merupakan fase utama (*main host phase*) untuk mengikat unsur-unsur aktinida masuk dalam kisi-kisi fase tersebut. Fase-fase penyusun *synroc -C* (*synroc* standar) yang mengandung 20 %berat limbah aktivitas tinggi (LAT) dan radionuklida-radionuklida yang dimasukkan ke dalam kisi-kisi berbagai fase mineral yang ada ditunjukkan pada Tabel 1.

Sejak tahun 1984 telah digunakan campuran *slurry* yang mengandung Ba dan Ca hidroksida dan alkoksida dari Al, Ti, dan Zr yang *transesterified* sebagai *precursor* yang lebih baik dari pada penggunaan *precursor* oksida [2]. Pada pengembangan *synroc* dikenal pula beberapa fase lain yang terbentuk dari turunan fase utama dengan unsur-unsur yang lain yang terkandung dalam limbah, yaitu : *pyrochlore* (CaATi₂O₇, dengan A = Gd, Hf, Pu, dan U), *brannerite* (AnTi₂O₆, dengan An = aktinida), dan *freudenbergite* (Na₂Fe₂Ti₆O₁₆).

Pada tahun 1985-1990 berkembang jenis-jenis LCAT yang mempunyai potensi untuk diimobilisasi dengan *synroc*. Jenis limbah tersebut adalah : a) limbah yang mengandung kelompok

Tabel 1. Komposisi dan mineralogi *synroc-C* (*synroc* standar) yang mengandung 20%berat LAT [1].

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 (RE), Aktinida (An)
<i>Perovskite</i> , CaTiO ₃	20	- Sr, Logam tanah jarang (RE), dan Aktinida (An)
Titan Oksida	10	
Fase paduan (<i>Alloy phases</i>)	5	- Tc, Pd, Rh, Ru, dll

Tabel 2. Beberapa pengembangan jenis *synroc* dari berbagai jenis limbah (radionuklida) [1,5,6,7].

Jenis <i>synroc</i>	Jenis limbah	Radionuklida dalam limbah	Fase Utama dalam <i>synroc</i>
1. <i>Synroc-C</i> standar	LCAT tipe <i>purex</i>	Hasil belah, Aktinida, dan logam tanah jarang	Lihat Tabel 1 [1]
2. <i>Synroc-C</i> kaya <i>zirconolite</i>	LCAT tipe <i>purex</i>	Kaya Aktinida (Np, Pu, Am, Cm, dll)	<i>Zirconolite</i> (CaZrTi ₂ O ₇) [1]
3. <i>Synroc</i> kaya <i>pyrochlore</i>	LCAT	Pu dan U	<i>Pyrochlore</i> (CaATi ₂ O ₇ , A=Gd, Hf, Pu, dan U) [1]
4. <i>Synroc</i> kaya <i>hollandite</i> dan <i>perovskite</i> .	Limbah hasil pemanasan LCAT	Tc, Cs dan Sr	<i>Hollandite</i> [Ba(Al,Ti) ₂ Ti ₆ O ₁₆] dan <i>perovskite</i> (CaTiO ₃) [5]
5. <i>Synroc-D</i> , modifikasi <i>synroc-C</i> kaya <i>hollandite</i>	LAT (<i>sludge</i>) dari excess persenjataan nuklir USA	Cs dan kontaminan tinggi Na ₂ O, SiO ₂ , dan Fe- oksida	<i>Hollandite</i> [Ba(Al,Ti) ₂ Ti ₆ O ₁₆] [6]
6. <i>Synroc</i> gelas komposit kaya <i>zirconolite</i> dan <i>perovskite</i>	LAT (<i>sludge</i>)	Aktinida, logam tanah jarang, Sr, dan garam alkali (Na-nitrat/nitrit)	<i>Zirconolite</i> (CaZrTi ₂ O ₇) dan <i>perovskite</i> (CaTiO ₃) [7]

unsur aktinida atau TRU dalam LCAT yang ditimbulkan dari proses olah-ulang bahan bakar nuklir bekas; b) limbah hasil pemanasan LCAT (untuk mengurangi efek *gamma heating*) yang mengandung radionuklida *mobile* umur panjang yaitu campuran ^{135}Cs ($T_{1/2} = 2,3$ juta tahun) dan ^{99}Tc ($T_{1/2} = 210.000$ tahun), yang juga mengandung ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28$ tahun); c) limbah plutonium yang ditimbulkan dari program persenjataan nuklir yang berlebihan (*excess US weapon Pu*); dan d) limbah *sludge* yang mengandung logam tanah jarang, aktinida, ^{135}Cs , ^{90}Sr dan garam alkali [1,2].

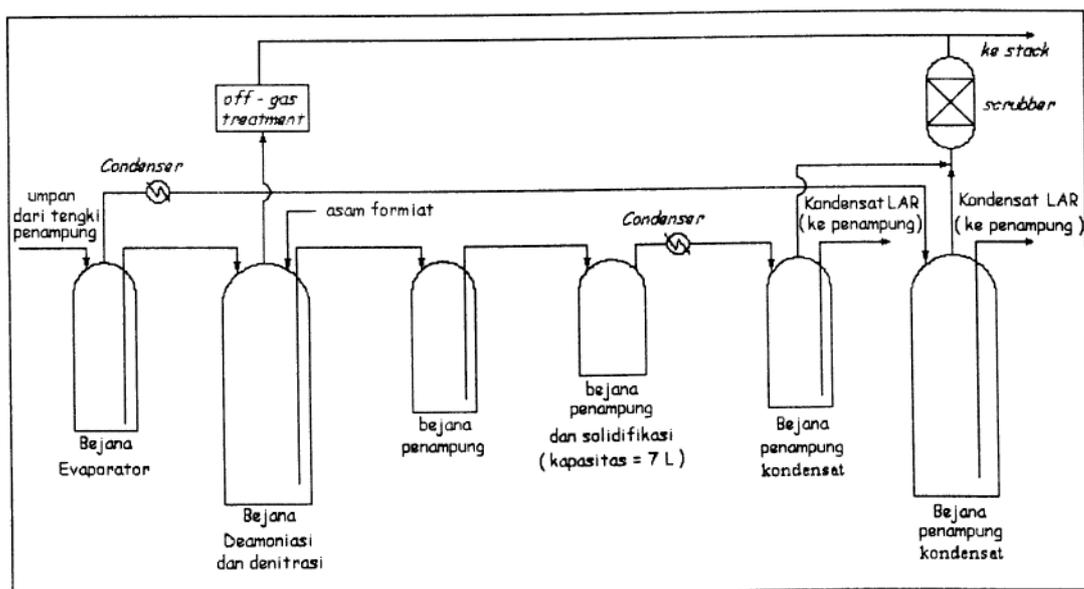
Di negara-negara maju di bidang nuklir seperti Amerika Serikat, Inggris dan Jepang telah mengembangkan *synroc* untuk imobilisasi berbagai jenis LCAT. Untuk imobilisasi berbagai jenis limbah yang berbeda-beda tersebut dikembangkan turunan *synroc* dengan memodifikasi komposisi fase-fase mineral *synroc-C*. Komposisi mineral *synroc* dipilih sesuai dengan karakterisasi unsur-unsur radionuklida yang terkandung dalam limbah sedemikian sehingga dapat terserap masuk ke dalam kisi-kisi fase mineral *synroc* yang kemudian menjadi fase utama dalam *synroc*. Secara rinci beberapa pengembangan *synroc* dari berbagai jenis limbah dan fase yang dominan dapat dilihat pada Tabel 2.

Pada dasarnya ruang lingkup pengembangan *synroc* tersebut adalah untuk imobilisasi LCAT tipe *purex*, limbah pemancar α umur panjang (U, Pu dan TRU), dan limbah hasil pemisahan radionuklida *mobile* umur panjang dari LCAT (Tc, Cs dan Sr) yang ditimbulkan dari olah-ulang bahan bakar nuklir bekas dimana pengungkungan secara aman diperlukan lebih dari skala waktu geologi. Kemudian dikembangkan untuk limbah radioaktif umur panjang dari produksi ^{99}Mo yang akan dibahas pada uraian berikut.

PENGEMBANGAN BAHAN *SYNROC* UNTUK IMOBILISASI LIMBAH DARI PRODUKSI MOLIBDENUM-99 (^{99}MO)

Dalam proses produksi ^{99}Mo , target bahan bakar uranium oksida (UO_2) diiradiasi dengan neutron di dalam reaktor nuklir sehingga 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. Dua aliran limbah cair yang ditimbulkan dari proses tersebut adalah: 1) limbah cair primer (LCP) yang mengandung banyak uranium sisa dan unsur-unsur hasil belah yang tidak diinginkan, dan 2) limbah cair sekunder (LCS) yang kurang radioaktif dari hasil pencucian kolom alumina. Kedua jenis limbah yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo tersebut masuk dalam katagori limbah radioaktif umur panjang yang mengandung kira-kira 0,8 M larutan asam nitrat dan sejumlah kecil ammonium nitrat.

Pengolahan limbah yang ditimbulkan dari produksi ^{99}Mo dilakukan melalui solidifikasi (pemadatan) yang melibatkan proses pengkonsentrasian limbah dengan evaporasi, destruksi ion ammonium, denitrasi parsial dari asam nitrat diikuti dengan kristalisasi garam uranil nitrat heksahidrat (UNH) seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Semua tahap dalam proses ini telah diuji dalam skala non-radioaktif [8]. Hasil solidifikasi dalam bentuk kristal yang mengandung UNH dan unsur-unsur hasil belah serta transuranium (TRU), dimasukkan dalam bejana baja tahan karat untuk penyimpanan sementara selama ~ 50 tahun. Untuk penyimpanan jangka panjang perlu dilakukan imobilisasi menjadi kemasan yang tahan



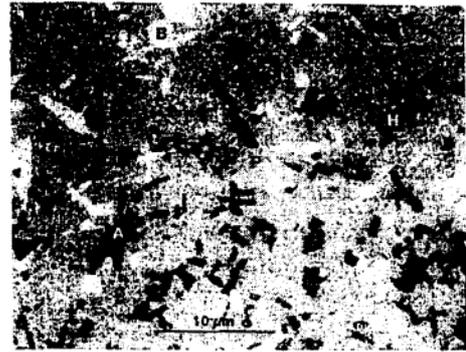
Gambar 1. Skema diagram proses solidifikasi limbah dari produksi radioisotop ^{99}Mo [8].

selama penyimpanan lestari (jangka panjang) dalam formasi geologi tanah dalam. Pengembangan teknologi imobilisasi dengan bahan *synroc* merupakan alternatif imobilisasi limbah dari produksi ^{99}Mo .

Pengembangan imobilisasi limbah dengan *synroc* tergantung dari jenis radionuklida dalam limbah. Jenis kandungan radionuklida dalam limbah dari produksi ^{99}Mo mirip dengan kandungan radionuklida dalam LCAT dari proses olah ulang bahan bakar bekas, hanya saja kuantitas masing-masing radionuklida tersebut berbeda tergantung pada kadar (%) pengkayaan ^{235}U , lama waktu iradiasi, dan daya reaktor. Oleh karena itu berdasar data pengembangan *synroc* dari berbagai LCAT seperti tersebut pada Tabel 2, maka ANSTO (Australia) telah mengembangkan *synroc* untuk imobilisasi limbah dari produksi ^{99}Mo . Dari pengembangan ini diperoleh *synroc* yang mengandung sampai 44%berat limbah *calcine* (hasil solidifikasi limbah cair dari produksi ^{99}Mo) dengan kualitas sangat bagus sebanding dengan *synroc* standar (*Synroc-C* pada Tabel 1). Mikrostruktur hasil *synroc* tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada Gambar 2, struktur kristal *synroc* dari limbah produksi ^{99}Mo ini terlihat ada 4 fase mineral yang terbentuk yaitu : *pyrochlore* (CaTi_2O_7 , A = Gd, Hf, Pu, dan U), *brannerite* (AnTi_2O_6 , dengan An = aktinida U, Np, Pu, Am, Cm, dll.); *Hollandite*, $[\text{Ba}(\text{AlTi})_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}]$ yang dapat mengikat Cs dan Rb; dan fase paduan Al titanat yang dapat mengikat hasil fisi golongan logam transisi seperti Tc, Pd, Rh, Ru, dan lain-lain.

Hasil-hasil studi dan penelitian dasar yang mendukung pengujian *synroc* dari limbah produksi ^{99}Mo yaitu studi daya tahan terhadap



Gambar 2. Gambar tampilan hamburan balik elektron dengan alat SEM untuk *synroc* (keramik titanat) kepadatan penuh (*fully dense*) yang mengandung 44%berat *calcine* hasil solidifikasi limbah produksi ^{99}Mo (P = *pyrochlore*, B = *brannerite*, H = *hollandite*, dan A=Al titanat) [8].

fasa air (laju pelindihan) dan kerusakan akibat radiasi dibandingkan dengan *synroc* dari jenis limbah yang lain dibahas pada uraian berikut.

Studi Daya Tahan Terhadap Fasa Air

Beberapa data analisis laju pelindihan (*leaching rates*) untuk studi daya tahan *synroc* limbah dari produksi ^{99}Mo terhadap fasa air dibandingkan dengan laju pelindihan *synroc* dari berbagai limbah yang serupa dapat dilihat pada Tabel 3. Di sini dapat dilihat bahwa laju pelindihan untuk beberapa unsur yang terkandung dalam *synroc* sangat rendah. Bahkan untuk *synroc* limbah dari produksi ^{99}Mo terlihat ada beberapa unsur yang tidak terlindih yaitu : Pu, Gd, dan Hf (yang terikat dalam fase *pyrochlore*), aktinida Np, Am, dan Cm (yang terikat dalam fase *brannerite*), Rb (yang terikat dalam fase *hollandite*),

Tabel 3. Laju pelindihan (*leaching rates*) *synroc* yang mengandung limbah simulasi dari produksi ^{99}Mo dibandingkan dengan *synroc* dari berbagai jenis limbah lain. [1,5,8,9,10,11].

Jenis <i>synroc</i> dan limbah	Unsur yang terlindih	Laju Pelindihan ($\text{g.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$)	Medium	Waktu pengujian	Peneliti
<i>Synroc</i> limbah dari produksi ^{99}Mo (44%berat limbah simulasi)	Ba Cs Sr Ti U	$2,0 \times 10^{-2}$ $1,3 \times 10^{-1}$ $1,3 \times 10^{-1}$ $3,0 \times 10^{-5}$ $9,0 \times 10^{-5}$	Air bebas ion, 70 °C	7 hari	Levins [8]
<i>Synroc-C</i> , limbah TRU	Np, Pu, Am, Cm	$10^{-5} - 10^{-6}$	Air bebas ion, 70 °C	1000 hari	Vance dkk[5]
<i>Synroc-C</i> , limbah Cs dan Tc	Cs Tc	5×10^{-5} $< 5 \times 10^{-5}$	Air bebas ion, 70 °	2 – 3 tahun	Jostsons dkk[9]
<i>Synroc-C</i> , limbah Pu dengan penambahan Gd	Pu dan Gd Ti, Zr, Hf	1×10^{-6} Tak terdeteksi	Air bebas ion, 70 °C		Jostsons dkk [10]
<i>Synroc-C</i> kaya <i>zirconolite</i> , LCAT mengandung Pu	Pu dan Gd	1×10^{-5}	Air bebas ion, 70 °C		Jostsons dkk, Weber dkk, [10,11]
<i>Synroc-C</i> dengan <i>precursor slurry</i> , LCAT	Alkali dan alkali tanah	$< 1 \times 10^{-1}$ *) 1×10^{-5} **)	Air bebas ion, 90 °C	*) beberapa hari pertama **) 2000 hari	Vance [1]

dan unsur-unsur hasil belah golongan logam transisi Tc, Pd, Rh, Ru, dan lain-lain (yang terikat dalam fase paduan Al titanat).

Kemungkinan unsur-unsur tersebut sangat terikat kuat dalam fase masing-masing atau memang kandungannya dalam limbah sangat kecil. Bila dibandingkan dengan laju pelindihan unsur-unsur dari *synroc* dengan jenis limbah yang lain, maka *synroc* limbah dari produksi ^{99}Mo (dalam waktu pengukuran 7 hari) relatif sangat rendah dan tidak berbeda. Hal ini dapat dilihat bahwa laju pelindihan untuk unsur Ba, Cs, dan Sr relatif sama dengan unsur alkali dan alkali tanah pada *synroc-C* dengan *precursor slurry* (waktu pengukuran pada beberapa hari pertama). Begitu juga laju pelindihan U (sebagai salah satu unsur aktinida) relatif sama dengan unsur aktinida Pu, Np, Am, dan Cm dari *synroc-C* yang lain.

Studi Kerusakan Akibat Radiasi

Studi kerusakan akibat radiasi dilakukan dengan studi difraksi terhadap mineral-mineral sejenis *synroc metamict* dengan iradiasi elektron, neutron dan ion-ion berat terhadap cuplikan sintesis dan cuplikan-cuplikan yang ditambah (*doping*) dengan radionuklida pemancar α yaitu ^{244}Cm ($T_{1/2} = 18$ tahun) dan ^{238}Pu ($T_{1/2} = 87$ tahun). Proses kerusakan yang signifikan dan permanen terhadap bentuk limbah *synroc* hanya terjadi karena adanya peluruhan α , dengan kerusakan utama timbul dari atom-atom yang terpelanting (*recoil*), bukan partikel α itu sendiri. Karena *recoil* atom mempunyai jangkauan yang sangat pendek (~ 20 nm), maka kebanyakan kerusakan terjadi pada fase-fase yang mengandung aktinida pemancar α . Hasil-hasil penelitian pengaruh radiasi α terhadap *synroc* dapat dilihat pada Tabel 4.

Hasil penelitian (Tabel 4) menunjukkan bahwa adanya ^{238}Pu dan ^{244}Cm (radionuklida pemancar α) dalam *synroc* menyebabkan terjadinya *swelling* (mengembang) dan peningkatan laju pelindihan. Laju pelindihan untuk amorf *zirconolite* dan limbah *synroc* standar yang

didoping dengan ^{244}Cm meningkat walaupun hanya ~ 10 kali dibanding bila tidak *didoping* dengan ^{244}Cm (menjadi sekitar 1×10^{-4} sampai 1×10^{-5} g.m $^{-2}$.hari $^{-1}$) [11,12]. Peningkatan laju pelindihan tersebut ditandai dengan perubahan bentuk dari fase yang memuat radionuklida pemancar α (^{244}Cm). Adanya ^{238}Pu dan ^{244}Cm pada fase *zirconolite/pyrochlore* dan pada *synroc-C* menyebabkan terjadinya *swelling* sekitar 4-6,9% volume [13,14,15]. Perubahan struktur akibat kerusakan dari radiasi α dalam *zirconolite* ($\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$) dan *pyrochlore* (CaATi_2O_6) alam serta brannerite (AnTi_2O_6) telah dipelajari secara mendalam [16]. Dosis ion-ion berat (sebagai simulasi inti recoil α) menyebabkan perubahan bentuk terhadap fase-fase yang mengandung aktinida [17]. Oleh karena itu perlu menjadi perhatian utama terhadap bentuk limbah kristalin dari limbah TRU yang mengandung aktinida dalam konsentrasi tinggi akan kemungkinan terjadinya kerusakan akibat peluruhan α yang dapat mengubah bentuk kristal mereka. Perubahan bentuk tersebut berperan secara signifikan terhadap perubahan sifat-sifat fisika dan kimia. Walaupun demikian perbedaan *swelling* pada berbagai fase kristalin juga tidak menyebabkan *micro-cracking* (peretakan mikro) dalam *synroc-C*. Sedang pada *synroc* kaya natrium (Na), dimana jumlah *freudenbergik* ($\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$) yang signifikan distabilkan oleh natrium (Na) dan *micro-cracking* baru dapat diamati pada dosis sekitar 1×10^{18} peluruhan α /g [18].

Kejadian secara alami pada *synroc* fase *zirconolite* yang mendapat paparan radiasi sampai sekitar 3×10^{20} peluruhan α /g telah ditunjukkan dapat menahan unsur-unsur aktinida selama periode waktu sampai $2,5 \times 10^9$ tahun [19]. Dalam uji dipercepat menunjukkan bahwa perubahan sifat mikrostruktur *zirconolite* sintesis mirip dengan *zirconolite* alam yang mengandung uranium (U) dan/atau torium (Th) dan perubahan bentuk terjadi pada dosis radiasi α yang serupa.

Kerusakan akibat radiasi α dapat diminimalisasi dengan *annealing* secara termal. Penekanan kerusakan dengan *annealing* secara signifikan telah diamati pada

Tabel 4. Pengaruh radiasi terhadap kerusakan *synroc* (laju pelindihan dan *swelling*) [11-16].

Jenis <i>synroc</i>	Doping unsur pemancar α	Pengaruh radiasi α terhadap <i>synroc</i> (laju pelindihan dan <i>swelling</i>)	Peneliti
<i>Synroc-C</i> standar dan <i>Synroc</i> fase amorf <i>zirconolite</i> .	^{244}Cm	Laju pelindihan meningkat 10 kali menjadi 1×10^{-4} sampai 1×10^{-5} g.m $^{-2}$.hari $^{-1}$	Weber dkk, Mitamura dkk [11,12]
<i>Synroc</i> kaya <i>zircono-lite</i> dan <i>pyrochlore</i>	^{238}Pu	Terjadi <i>swelling</i> $\sim 6\%$ volume	Clinard dkk[13]
<i>Synroc-C</i> dan <i>speci-men</i> fase tunggal untuk <i>zirconolite</i> dan <i>perovskite</i>	^{238}Pu dan ^{244}Cm (11,2%berat $^{238}\text{PuO}_2$ atau 4%berat $^{244}\text{Cm}_2\text{O}_3$ dengan dosis sampai $1,5 \times 10^{19}$ α /g pada 300 °K)	Terjadi <i>swelling</i> 4,0 – 6,9 %volume. Perbedaan <i>swelling</i> pada berbagai fase tidak menyebabkan <i>micro-cracking</i> . Sedang pada <i>synroc</i> kaya Na, <i>micro-cracking</i> baru teramati pada dosis $\sim 1 \times 10^{18}$ peluruhan α /g	Ewing dkk, Houg & Marples Mitamura dkk [14,15]
<i>Synroc</i> fase <i>zircono-lite</i> , <i>pyrochlore</i> dan <i>brannerite</i>	Aktinida pemancar α .	Terjadi perubahan bentuk dengan faktor mendekati 3 dibanding dengan tidak <i>didoping</i> dengan aktinida pemancar α	Smith dkk[16]

eksperimen kerusakan α terhadap *synroc-C* pada temperatur serendah-rendahnya 200 °C [20]. Dari eksperimen tersebut menunjukkan laju pertumbuhan kerusakan α pada 200 °C adalah 40% lebih rendah dari pada yang diamati pada 30 °C. Proses *annealing* secara termal ini berperan penting untuk konsep ko-imobilisasi ¹³⁵Cs dan ²⁴⁴Cm dalam *synroc* untuk memberikan pemuatan (*loading*) ²⁴⁴Cm yang tinggi, karena panas peluruhan ¹³⁵Cs dapat digunakan untuk membatasi kerusakan akibat radiasi α dari ²⁴⁴Cm selama penyimpanan.

Dari hasil-hasil penelitian tersebut telah difahami perilaku *synroc* akibat radiasi α pada dosis tinggi yang menunjukkan bahwa kerusakan *synroc* relatif sangat rendah dan masih dapat diterima. Selain itu tidak ada tanda adanya proses terjadinya peretakan antar-butiran (*intergranular cracking*) pada pengepresan panas *synroc-C*.

PEMBAHASAN TEKNOLOGI IMOBILISASI LIMBAH DARI PRODUKSI ⁹⁹MO DENGAN BAHAN SYNROC DI INDONESIA

Di Indonesia, limbah radioaktif cair aktivitas tinggi (LCAT) yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR) mengandung unsur-unsur hasil belah, sisa uranium, dan unsur-unsur aktinida (TRU) minor. Limbah ini digolongkan menjadi LCAT karena mempunyai kandungan radionuklida mirip dengan LCAT dari olah-ulang bahan bakar nuklir bekas dan umurnya panjang. Imobilisasi jenis limbah ini telah dikembangkan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN dengan teknik vitrifikasi [21,22] dan dengan teknik polimerisasi [23]. Sedang hasil-hasil penelitian dan pengembangan *synroc* yang telah dilakukan oleh negara-negara maju di bidang nuklir termasuk Australia sebagaimana telah diuraikan pada bab di atas mempunyai prospek yang lebih baik dan dapat diadopsi dan dikembangkan sebagai alternatif untuk imobilisasi jenis LCAT yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo di IPR.

Perbandingan produksi ⁹⁹Mo dan limbah yang ditimbulkan yang dilakukan di ANSTO (Australia) dan IPR (Indonesia) dapat dilihat pada Tabel 5.

Pada Tabel 5 dapat dilihat bahwa di ANSTO digunakan target uranium oksida dengan pengayaan rendah (2% ²³⁵U) sedang di IPR digunakan target uranium oksida dengan pengayaan tinggi (93% ²³⁵U). Besarnya pengayaan ini sangat mempengaruhi jumlah unsur hasil belah dan TRU yang terbentuk dalam limbah. Untuk pengayaan rendah akan menghasilkan TRU lebih tinggi, dan unsur hasil belah lebih rendah, sedang untuk pengayaan tinggi sebaliknya. Adaptasi teknologi imobilisasi dengan *synroc* untuk jenis LCAT yang ditimbulkan dari produksi radioisotop ⁹⁹Mo di IPR dapat dilihat pada Gambar 3. Adaptasi di sini dapat dilakukan dengan 2 alternatif, yaitu Alternatif-I langsung diimobilisasi dengan *synroc* atau Alternatif-II yang terlebih dahulu dilakukan ekstraksi dengan asam dietilheksilfosfat untuk memisahkan ²³⁵U dan unsur-unsur hasil belah, kemudian baru dilakukan imobilisasi dengan *synroc*.

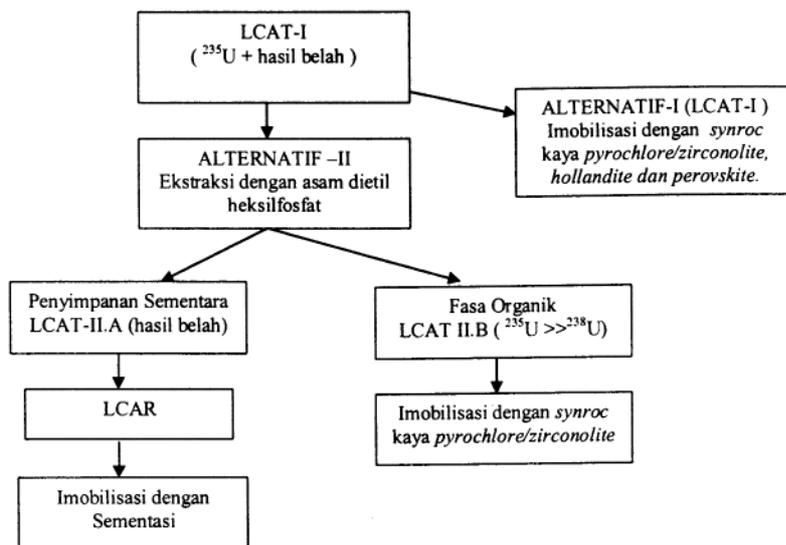
Model komposisi fase dalam *synroc* dikembangkan berdasarkan kandungan radionuklida dalam limbah seperti terlihat pada Tabel 6. Masing-masing radionuklida akan terserap dan masuk ke dalam kisi-kisi fase mineral yang sesuai. Berdasarkan proses yang lebih sederhana, maka adaptasi dan pengembangan teknologi imobilisasi dengan *synroc* untuk jenis LCAT tersebut lebih diarahkan pada imobilisasi langsung (Alternatif-I) dengan model komposisi *synroc* yang mengandung fase utama (kaya) *pyrochlore* atau *zirconolite*, *hollandite* dan *perovskite*, dengan penambahan unsur-unsur absorber neutron (Gd atau Hf) untuk mencegah kritikalitas, serta fase minor titan oksida dan paduan logam.

KESIMPULAN

Teknologi imobilisasi LCAT tipe *purex* yang mengandung radionuklida hasil belah dan transurium (aktinida) dengan *synroc* merupakan alternatif untuk mengganti teknologi imobilisasi gelas-borosilikat

Tabel 5. Perbandingan produksi radioisotop ⁹⁹Mo dan limbah yang ditimbulkan yang dilakukan di ANSTO (Australia) dan di IPR (Indonesia).

Uraian	ANSTO (Australia)[8]	IPR (Indonesia) [21,22]
<u>Produksi ⁹⁹Mo</u> - Target uranium oksida - Waktu iradiasi di reactor	- Pengayaan rendah (2% ²³⁵ U) - Sampai 7 hari di HIFAR	- Pengayaan tinggi (93% ²³⁵ U) - Selama 4-5 hari di RSG-GAS
<u>Limbah yang ditimbulkan</u> - Kandungan limbah (karakteristik/komponen LCAT) - Jumlah limbah per tahun - Pengelolaan limbah	Sisa uranium 9 – 190 g U/liter (²³⁵ U << ²³⁸ U), Hasil belah (nuklida mayor ¹³⁷ Cs dan ⁹⁰ Sr), TRU (dari reaksi ²³⁸ U dengan netron). Dalam media 0,6-0,8 M HNO ₃ dan 75-750 mg/liter NH ₄ NO ₃ . 90 liter LCP dan 230 liter LCS per tahun Solidifikasi kemudian disimpan sementara selama ~ 50 tahun. Untuk jangka panjang telah dikembangkan teknologi imobilisasi dengan <i>synroc</i>	Sisa uranium ~200 g U/liter (²³⁵ U >> ²³⁸ U), Hasil belah (nuklida mayor ⁹⁹ Nb, ⁶³ Ni, ⁵⁵ Fe, ⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁵⁹ Fe, ⁵¹ Cr), TRU (dari reaksi ²³⁸ U dengan netron). Dalam media asam nitrat 120 liter (2 drum) per tahun. Total aktivitas 600 Ci. Disimpan sementara, dan untuk jangka panjang dilakukan adaptasi dan pengembangan teknologi imobilisasi dengan <i>synroc</i>



Gambar 3. Adaptasi teknologi immobilisasi dengan synroc untuk LCAT yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo di Instalasi Produksi Radioisotop (IPR).

(dengan teknik vitrifikasi), karena *synroc* mempunyai kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk immobilisasi semua unsur radioaktif dalam LCAT, serta ketahanan terhadap fasa air (air tanah) dalam penyimpanan lestari pada formasi geologi tanah dalam. Pengembangan komposisi *synroc* untuk immobilisasi limbah tergantung pada kandungan radionuklida, untuk LCAT yang ditimbulkan dari kegiatan produksi radioisotop ⁹⁹Mo (dari target uranium oksida pengkayaan rendah) yang mengandung uranium, transuranium (aktinida) dan radionuklida hasil belah telah dikembangkan *synroc* yang mengandung fase utama (kaya) *pyrochlore* (CaATi_2O_7), *brannerite* (AnTi_2O_6), dan *hollandite* ($\text{Ba[Al.Ti]}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$) dengan penambahan unsur-unsur absorber neutron (Gd atau Hf) untuk mencegah kritikalitas. Semua studi ilmu pengetahuan dan penelitian dasar memberikan konfirmasi bahwa laju pelindihan dan kerusakan akibat radiasi α terhadap *synroc* relatif sangat rendah dan dapat diterima.

Di Indonesia, adaptasi teknologi immobilisasi limbah dengan bahan *synroc* untuk LCAT yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo dilakukan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN melalui penelitian dan pengembangan lebih lanjut. Sesuai dengan karakteristik LCAT yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo yang mengandung unsur-unsur hasil belah, uranium dan transuranium (aktinida) minor maka pengembangan diarahkan pada immobilisasi langsung (Alternatif-I) dengan model komposisi *synroc* yang mengandung fase utama (kaya) *pyrochlore* atau *zirconolite*, *hollandite* dan *perovskite* dengan penambahan unsur-unsur absorber neutron (Gd atau Hf) untuk mencegah kritikalitas, serta fase minor titan oksida dan paduan logam.

DAFTAR ACUAN

- [1]. E.R. VANCE, Status of Synroc Ceramics for HLW, *Proceedings of The 2nd Bianual*

Tabel 6. Model komposisi fase mineral dalam *synroc* untuk immobilisasi limbah yang ditimbulkan dari produksi ⁹⁹Mo di IPR berdasar jenis kandungan radionuklidanya.

Kandungan radionuklida dalam limbah	Fase mineral yang sesuai	Model komposisi fase mineral dalam <i>synroc</i>
Alternatif I (LCAT - I) - Uranium sisa (²³⁵ U >> ²³⁸ U) - TRU (dari reaksi ²³⁸ U dengan neutron) - Unsur hasil belah (⁹⁹ Nb, ⁶³ Ni, ⁵⁵ Fe, ⁵⁴ Mn, ⁵⁸ Co, ⁵⁹ Fe, ⁵¹ Cr)	- <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i> . - <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i> - <i>Zirconolite</i> , <i>hollandite</i> dan <i>perovskite</i> .	<i>Synroc</i> kaya <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i> , <i>hollandite</i> dan <i>perovskite</i> dengan penambahan penyerap neutron (Gd atau Hf), serta fase minor titan oksida dan paduan logam
Alternatif II (LCAT-II.B) - Uranium sisa (²³⁵ U >> ²³⁸ U) - TRU (dari reaksi ²³⁸ U dengan neutron). - Kontaminan hasil belah	- <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i> . - <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i>	<i>Synroc</i> kaya <i>pyrochlore</i> atau <i>Zirconolite</i> dengan penambahan penyerap neutron (Gd atau Hf), serta fase minor <i>hollandite</i> , <i>perovskite</i> , titan oksida dan paduan logam

- International Workshop on HLRW Management*, Departement of Nuclear Engineering, Faculty of Engeneering, Gadjah Mada University, Yogyakarta (1999)
- [2]. D.M.LEVINS, and A.JOSTSONS, R&D in Radioactive Waste Management at ANSTO, *The 2nd Seminar on RWM, Regional Cooperation in Asia*, Kuala Lumpur- Malaysia (1996)
 - [3]. A.E. RINGWOOD, S.E.KESSON, N.G.WARE, W.HIBBERSON, and A.MAYOR, *Nature*, **278**, (1979) 219-233
 - [4]. E.RINGWOOD, S.E.KESSON, K.D.REEVE, D.M.LEVINS, and E.J.RAMM, *Radioactive Wasteforms for the Future*(Eds W.LUTZE and R.C.EWING), Elsevier, Amsterdam, (1988) 233-334
 - [5]. E.R. VANCE, A.JOSTSONS and K.PHART, Synroc as a Ceramic Wasteform for Deep Geological Disposal, *Int. Conf. on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste*, Winnipeg (1996)
 - [6]. A.E.RINGWOOD, S.E.KESSON AND N.G WARE, Immobilization of US Defence Nuclear Waste Using the Synroc Process, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management*, **2** (Ed.C.J.M Northrup), Plenum Press, New York (1980) 265
 - [7]. A.JOSTSONS, E.R.VANCE and D.J.MERCER, Advanced HLW Management Strategies Employing Both Synroc and Borosilicate Glass Wasteforms, *Proc.of Global'95*, Versailles, France (1995) 774
 - [8]. D.M.LEVINS, ANSTO's Waste Management Action Plan, *Third Seminar on RWM, Nuclear Cooperation in Asia*, China (1997)
 - [9]. A. JOSTSONS, E.R.VANCE AND K.PHART, Immobilisation of High Concentrations of Partitioned Long-Lived Radionuclides in Synroc, *Tenth Pacific Basin Nuclear Conference*, Kobe, Japan (1996)
 - [10]. A. JOSTSONS, E.R.VANCE, R.A.DAY, K.PHART and M.W.A.STEWART, Surplus plutonium Disposition via Immobilisation in Synroc, Spectrum '96, *International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management*, Seattle, WA (1996)
 - [11]. W.J.WEBER, J.W. WALD and HJ.MATZKE, *J. Nuclear Materials*, **138** (1986) 196
 - [12]. H.MITAMURA, S.MATSUMOTO, M.W.A. STEWART, T. TSUBOI, M.HASHIMOTO, E.R.VANCE, K.P.HART, Y.TOGASHI, H.KANAZAWA, C.J.BALL and T.J.WHITE, *J. Am. Ceram. Soc.*, **77** (9) (1994) 2255-2264
 - [13]. F.W.Jr.CLINARD, D.E.PETERSON, D.L.ROHR and L.W.HOBBS, *J. Nuclear Materials*, **126** (1984) 245
 - [14]. R.C. EWING, W.J.WEBER and F.W.Jr.CLINARD, Radiation Effects in Nuclear Waste Forms for High Level Radioactive Waste, *Prog. In Nuclear Energy*, **29** (1995) 63
 - [15]. A. HOUG and J.A.C. MARPLES, The Radiation Stability of Synroc : Final Report, *AEA Technology Report*, AEA-FS-0201 (H), (1993)
 - [16]. K.L. SMITH, N.J. ZALUZEC and GR. LUMPKIN, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management XXI*, Eds. I.G Mc.KINLEY and C.Mc.COMBIE, Material Research Society, Pittsburgh, PA, USA (1998) 931
 - [17]. GR.LUMPKIN and R.C.EWING, *Scientific Basis for Nuclear Waste Management VIII*, Eds. C.M.JANTZEN, J.A.STONE and R.C. EWING, Materials Research Society, Pittsburgh, PA, USA, (1985) 647
 - [18]. H.MITAMURA, S.MATSUMOTO, T.MIYAZAKI, T.J.WHITE, K.NUGAKA, Y.TOGASHI, T.SAGAWA, S.TASHIRO, D.M.LEVINS and A.KIKUCHI, *J.Am.Ceram. Soc.*, Vol. **73** (11), (1990) 3433
 - [19]. GR.LUMPKIN, K.PHART, P.J. McGLINN, T.E. PAYNE, R.GIERE and C.T.WILLIAMS, *Radiochemica Acta*, **66/67**, (1994) 469
 - [20]. K.D.REEVE, E.R.VANCE, K.PHART, K.L.SMITH, GR.LUMPKIN and D.J.MERCER, Reformulation of Synroc for Purex High Level Nuclear Wastes Containing Further Chemical Additions, *Proc. International Ceramic Conference*, Austceram 92 (Ed M.J. Bannister), CSIRO, Australia (1992) 1014
 - [21]. MARTONO, H. dan AISYAH, Efek Radiasi Terhadap Gelas Limbah Hasil Vitrifikasi, *Prosiding Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Iptek Nuklir*, P3TM-BATAN, Yogyakarta (2002)
 - [22]. MARTONO, H. dan WIDIATMO, Perancangan Melter Untuk Pengolahan Limbah Cair Aktivitas Tinggi Secara Vitrifikasi, *Seminar Hasil Penelitian Dan Kegiatan P2PLR 2001*, Serpong (2002)
 - [23]. AISYAH dkk, Pengaruh Keasaman dan kandungan Limbah pada Imobilisasi Limbah Trasuranium dari IRM dengan Polimer, *Seminar Hasil Penelitian Dan Kegiatan P2PLR 2003*, Serpong (2004)