



PENGEMBANGAN TEKNOLOGI IMOBILISASI KOTORAN SLUDGE RADIOAKTIF MENGANDUNG URANIUM MENGGUNAKAN BAHAN MATRIKS SYNROC

Gunandjar²

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Pamulang, Jl. Surya Kencana No.1, Tangerang Selatan, Indonesia

E-mail : dosen01521@unpam.ac.id¹

Masuk : 09 Maret 2020 Direvisi : 15 Maret 2020 Ditetapkan : 19 Maret 2020

Abstract. The decommissioning of Phosphoric Acid Purification - Petrokimia Gresik (PAP-PKG) facility generates radioactive liquid waste containing uranium. The waste was treated by bio-oxidation process using bacteria for volume reduction of the waste to become radioactive sludge waste. The sludge waste contains uranium including long-life alpha radioactive waste classification, must be immobilized by solidification process. In this research aim to immobilization of the radioactive sludge waste by solidification using synroc matrix material of Zirconolite-Titanate Synroc, Zirconolite-Phosphate Synroc, and Siliconolite-Titanate Synroc. The precursor oxides composition as matrix material of Zirconolite-Titanate Synroc (in % weight) i.e : Al₂O₃ (5.4); BaO (5.6); CaO (11.0); TiO₂ (71.4) and ZrO₂ (6.6). The same composition made for precursor oxides of Zirconolite-Phosphate Synroc with substituted of TiO₂ by Ca₃(PO₄)₂. For the precursor oxides for matrix material of Siliconolite-Titanate Synroc was used Coal Fly Ash (CFA) with composition (in % weight) i.e : CFA (18), CaO (10,1) ; BaO (5,6) ; dan TiO₂ (71,4). The immobilization process of the waste using synroc matrix was carried-out by mix the radioactive sludge waste with precursor oxides, this mixture was dried at temperature 130 oC, and it was calcined at temperature 750 oC for 30 minutes, then it was pressed in the moulder. Further process was the pemanasan at temperature of 900-1300 oC for 3 hours to form the solid multiphases of monolite ceramic. Waste loading in the synroc block was 30 % wt. The quality of the synroc block produced from the immobilization was determined by testing of density, compressive strength, and leach-rate of uranium. The testing results showed that the quality of the third of waste synroc blocks by the pemanasan process are according to the quality of Synroc-C (Standard Synroc) Zirconolite-Titanate waste by Hot Isostatic Pressing (HIP) and also according to the quality of synroc recommended by IAEA.

Keywords: immobilization of waste, uranium radioactive waste, long life alpha waste, synroc.

Abstrak. Kotoran radioaktif cair setelah dilakukan proses dekomisioning dari sarana Pengolahan Asam Fosfat Petrokimia Gresik (PAF – PKG). Kotoran tersebut diolah dengan proses biooksidasi menggunakan bakteri untuk reduksi volume kotoran menjadi kotoran *sludge* radioaktif. Kotoran *sludge* tersebut mengandung uranium termasuk dalam klasifikasi kotoran radioaktif alfa umur panjang yang harus diimobilisasi melalui proses pemadatan. Pada penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan teknologi imobilisasi kotoran *sludge* radioaktif melalui proses pemadatan menggunakan bahan matrik *Synroc* Zirkonolit-Titanat, *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, dan *Synroc* Silikonolit-Titanat. Komposisi prekursor oksida sebagai bahan matrik *Synroc* Zirkonolit-Titanat (dalam % berat) adalah : Al₂O₃ (5,4); BaO (5,6); CaO (11,0); TiO₂ (71,4) dan ZrO₂ (6,6). Dengan komposisi yang sama dibuat untuk prekursor oksida *Synroc* Zirkonolit-Fosfat dengan mengganti TiO₂ dengan Ca₃(PO₄)₂. Komposisi prekursor oksida untuk bahan matrik *Synroc* Silikonolit-Titanat digunakan Abu Terbang Batubara (ABT) dengan komposisi (dalam % berat) adalah : ABT (18) ; CaO (10,1) ; BaO (5,6) ; dan TiO₂ (71,4). Proses imobilisasi dilakukan dengan cara mencampurkan kotoran *sludge* radioaktif dengan prekursor oksida, kemudian campuran tersebut dikeringkan pada temperatur 130 0C, dilanjutkan proses kalsinasi pada temperatur 750 0C selama 30 menit, kemudian serbuk dipres dalam cetakan. Proses berikutnya adalah proses pemanasan pada temperatur 900 - 1300 0C selama 3 jam untuk membentuk suatu keramik multi-fase yang padat. Kualitas blok *synroc* kotoran hasil imobilisasi ditentukan dengan pengujian densitas, kuat tekan, dan kecepatan pelindihan uranium. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas ketiga jenis blok *synroc* kotoran dengan proses pemanasan tersebut sesuai dengan kualitas hasil blok *Synroc*-C (*Synroc* Standar) Zirkonolit-Titanat kotoran dengan proses pres-panas isostastik dan memenuhi kualitas yang direkomendasikan oleh IAEA.

Kata Kunci: imobilisasi kotoran, kotoran radioaktif uranium, kotoran alfa umur panjang, *synroc*

PENDAHULUAN

Dengan diberhentikannya Pengolahan Asam Fosfat-Petrokimia Gresik (PAF-PKG) oleh BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) pada tanggal 12 Agustus 1989, kemudian dilakukan dekomisioning dengan izin dari BAPETEN (Badan Pengawas Tenaga Nuklir) yang tertuang dalam Surat Izin Dekomisioning No. 286/ID/DPI/ 14-X/2004 tanggal 14 Oktober 2004 yang berlaku selama 5 tahun sampai dengan 13 Oktober 2009 [1]. Kegiatan dekomisioning sarana PAF-PKG ini menghasilkan kotoran radioaktif cair berupa organik dengan kandungan uranium , gabungan larutan (solven) D2EHPA [*Di(2-Ethyl Hexyl Phosphoric Acid)*] ($C_{16}H_{35}O_4P_0$), TOPO (*Triocetylphosphine Oxide*) ($C_{24}H_{51}OP$), dan kerosen (pada rasio 4:1:16) serta air (rasio pelarut terhadap air 1:3), yang mempunyai volume 371 m³, pH 3,48, *Chemical Oxygen Demand* (COD) 31.500 ppm, dan *Biological Oxygen Demand* (BOD) 2.200 ppm, serta aktivitas alfa (α) dan beta (β) berturut-turut 1200 dan 2600 Bq/liter, ditampung dalam bak penampung berukuran 14x15x3 m³ di lokasi sarana PAF-PKG. Kotoran ini berupa kotoran benda dengan resiko bahaya cukup tinggi dan beracun (B3) yang radioaktif, mempunyai kandungan radionuklida uranium (U-238) dan 14 anak luruhnya yaitu U-234, Th-234, Th-230, Pa-234, Ra-226, Rn-222, Po-218, Po-214, Po-210, Bi-214, Bi-210, Pb-214, Pb-210, dan Pb-206 [2]. Uranium serta cabang cabang peluruhannya berupa radionuklida pemancar alfa sebagaimana sifat partikel alfa yang mempunyai daya rusak besar maka jika masuk ke dalam tubuh akan menimbulkan kerusakan pada jaringan biologis. Selain memiliki daya rusak terhadap jaringan biologis, anak luruh U-238 seperti U-234, Th-234, Th-230, Ra-226, Po-210, dan Pb-210 mempunyai sifat radiotoksitas yang sangat tinggi [2,3]. Agar terhindar dari dampak pencemaran lingkungan, kotoran dapat diolah melalui proses biooksidasi (oksidasi biokimia) agar nilai aktivitas COD, BOD dan pH menurun serta radioaktivitasnya menjadi nilai yang memenuhi baku mutu kotoran cair industri pada nilai COD \leq 100 ppm, BOD \leq 50 ppm, dan pH 5-9 [4], serta baku mutu tingkat radioaktivitas di lingkungan untuk uranium dalam air \leq 1000 Bq/liter [5]. Pengerjaan biooksidasi dibuat setelah pemurnia cairan dengan NaOH, digunakan campuran bakteri aerob yang digunakan meliputi *bacillus sp*, *aeromonas sp*, *pseudomonas sp*, dan *arthobacter sp*. Pengolahan kotoran dengan proses biooksidasi diperoleh *sludge* (lumpur) radioaktif dan beningan. Beningan yang dihasilkan telah memenuhi baku mutu dengan nilai COD dan BOD berturut-turut sebesar 51 ppm dan 22 ppm, dan aktivitas < 1000 Bq/liter. Hasil *sludge* merupakan kotoran radioaktif beraktivitas alfa pada harga 0,4 - 40,2 Bq/liter, dan beta pada nilai 1173 - 4100 Bq/liter, kadar padatan total 40-50 % berat [1].

Kotoran *sludge* radioaktif tersebut harus diisolasi guna melindungi masyarakat dan lingkungan dari dampak radiasi yang berbahaya. Isolasi kotoran radioaktif dilakukan dengan cara imobilisasi melalui proses solidifikasi (pemadatan) kotoran dengan suatu bahan matriks, sehingga diperoleh blok hasil solidifikasi dimana kotoran radioaktifnya terkungkung dan terisolasi di dalamnya. Bahan matriks yang biasa digunakan dalam proses solidifikasi kotoran radioaktif antara lain semen, aspal (bitumen), plastik polimer, dan gelas. Pengembangan terakhir telah digunakan bahan matriks *synroc*. Pemilihan bahan matriks tersebut tergantung pada tinggi rendahnya aktivitas, panjang-pendeknya waktu paruh, dan sifat fisik dan kimia dari kotoran. Kotoran *sludge* radioaktif dari dekomisioning sarana PAF-PKG mengandung uranium dan anak luruhnya termasuk dalam kriteria kotoran pemancar alfa berumur panjang aktivitas rendah atau sedang. Kotoran ini dapat disolidifikasi menggunakan bahan matriks plastik polimer atau aspal. Pengembangan terakhir telah digunakan bahan matriks *synroc*. *Synroc* adalah bentuk kristalin padat yang tersusun dari gabungan fase-fase titanat atau fosfat yang stabil dan dipilih karena kestabilan geokimia dan kemampuan kolektif untuk imobilisasi semua faktor radioaktif hasil belah dan aktinida umur panjang dalam kotoran radioaktif. Teknik pembuatan *synroc* dengan proses pres-panas pada temperatur tinggi telah dikembangkan di beberapa negara seperti Australia, Amerika Serikat, Inggris dan Jepang [6].

Dalam penelitian ini dilakukan untuk pengembangan tiga jenis *Synroc* sebagai alternatif matriks untuk imobilisasi kotoran *sludge* radioaktif dari dekomisioning sarana PAF-PKG. Tiga jenis *synroc* tersebut adalah *Synroc* Zirkonolit-Titanat (*Zirconolite-Titanate Synroc*), *Synroc* Zirkonolit-Fosfat (*Zirconolite-Phosphate Synroc*), dan *Synroc* Silikonolit-Fosfat (*Siliconolite-Phosphate Synroc*). Jenis *Synroc* Silikonolit-Fosfat dalam penelitian ini dikembangkan menggunakan Abu Terbang Batubara (ATB) atau *Coal Fly Ash (CFA)* sebagai matriks ditambah BaO, CaO, dan TiO₂ sebagai perkursor tambahan. Pembentukan *synroc* dilakukan melalui proses pemanasan yang cukup tinggi (900-1300 °C). Mutu dari blok *synroc* kotoran dan kondisi proses imobilisasi yang terbaik ditentukan dengan pengujian karakteristik hasil blok *synroc* kotoran yang meliputi pengujian densitas, kuat tekan, dan kecepatan pelindihan uranium.

Maksud dari percobaan ini untuk memperoleh hasil dari proses pembuatan menggunakan teknik imobilisasi kotoran *sludge* yang mempunyai kandungan dari hasil proses dekomisioning sarana PAF-PKG memanfaatkan bahan matriks *synroc* yang terbaik dengan proses pemanasan temperatur tinggi.

Riset ini dilakukan agar usaha memperoleh teknologi sistem imobilisasi kotoran radioaktif yang mempunyai kandungan uranium yang ditimbulkan dari sistem penyediaan materi bakar nuklir bagus lewat alur penambangan ataupun dari sistem pengerjaan asam fosfat, akibatnya sanggup menunjang program PLTN yang hendak tiba di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Pengembangan bahan matriks *synroc* pertama kali dikemukakan sebagai alternatif pengganti gelas borosilikat untuk imobilisasi kotoran cair aktivitas tinggi (LCAT), dengan ide dasar memasukkan kotoran hasil belah dan aktinida ke dalam kisi-kisi kristal mineral sintetis yang telah diketahui mempunyai umur yang sangat panjang (beberapa juta tahun) di alam. 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 – 17,1 % berat ThO₂ dan 0,7 – 6,0 % berat UO₂ dan telah dihitung dosis peluruhan alfa adalah 0,2 – 1,0 x 10¹⁶ alfa /mg yang ekuivalen dengan umur suatu *synroc* yang disimpan selama 10⁵ - 10⁶ tahun [6]. Mineral-mineral yang dipilih terutama adalah mineral silikat (*pollucite* CsAlSi₂O₆, *Strosium feldspar* SrAl₂Si₂O₈), fosfat (monasit, CePO₄, *apatite* Ca₅(PO₄)₃F) dan oksida (*fluorite-structured* UO₂) dan campuran fase-fase tersebut yang dibentuk melalui proses pemanasan pada temperatur tinggi sekitar 1100 °C setelah alumina, fosfat, dan silika sebagai prekursor oksida ditambahkan pada kotoran hasil fisi. Proses pembentukan *synroc* dilakukan pada temperatur sangat tinggi sehingga disebut *synroc supercalcine* yaitu *synroc* yang dibuat dengan proses pemanasan dalam temperatur super tinggi mendekati titik leburnya.

II.1. Imobilisasi Dengan Bahan Matriks *Synroc* Zirkonolit-Titanat

Pada tahun 1978, Ringwood [7] mendeteksi *Synroc* Zirkonolit-Titanat yang merupakan gabungan mineral titanat yang jauh lebih tahan terhadap air dibanding dengan sederetan mineral-mineral *supercalcine*. Hasil paduan *synroc* melalui proses perpaduan antara LCAT dengan bahan prekursor oksida sehingga berupa *slurry*, selanjutnya dilakukan pengeringan *slurry* pada temperatur 1300 °C (hasilnya berupa serbuk), material serbuk ini dipanaskan menggunakan media Ar-44% H₂, setelah itu dimasukkan ke dalam baja tahan karat.

METODOLOGI

Kampung Cilenggang 2 No 89 desa Cilenggang kecamatan Serpong Kota Tangerang Selatan, Banten menjadi tempat penelitian ini dilakukan. Selaian itu penelitian ini juga dilakukan labpratorium Teknik Mesin Unpam.. alat uji ini di disain berupa air dalam bak penampung yang diletakan pada ketinggian tertentu kemudian dipompa menggunakan pompa sentrifugal. Hal ini dimaksudkan untuk memenuhi toren penampung. Toren ini memiliki volume 200 ltr, dengan variasi ketinggian 1,7m , 3,4m, dan 5,1m. Pipa yang menghubungkan toren dengan turbin dirancang dengan diameter yang sama. Pipa tersebut dipasang alat ukur tekanan (*pressure gauge*) dan alat ukur *rotameter*. Alat ini digunakan untuk mengukur tekanan dan laju aliran air. Nozzle di pasang pada ujung pipa yang bertujuan supaya laju aliran dapat bertambah kencang karena berhasil memutarakan susu dengan optimal. Selain itu dipasang juga neraca pegas pada turbin agar bisa menghitung laju putaran turbinnya. Berikut desain rangkain turbin crossflow dengan variasi ketinggian dilakukan proses pres-panas pada temperatur 1150-1200 °C dan tekanan 500-1000 bar agar terbentuk keramik monolit *synroc* multifase yang sangat padat dan kompak [8]. Metode pres panas isostastik ini sudah dilakukan di beberapa negara seperti : Australia, Inggris, Amerika dan Jepang. Paduan prekursor 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(AlTi)₂Ti₆O₁₆], *Zirconolite* (CaZrTi₂O₇), dan *Perovskite* (CaTiO₃), selain itu terdapat fase titan-oksida dan fase paduan dalam jumlah lebih kecil. Fase inti mineral *synroc* dapat terbentuk pada temperatur tinggi sekitar 1150 - 1200 °C.

Awal mula dikembangkannya *synroc*, sehingga sudah dikembangkan *Synroc- C* yakni tipe *Synroc* Zirkonia-Titanat yang dikembangkan untuk

Fase Turunan	Rumus Kimia	Radionuklida Penyusun Fase Turunan
<i>Pyrochlore</i> a)	$CaATi_2O_7$ $An Ti_2O_6$ $Na_2Fe_2Ti_6O_{16}$	- Ca dan A (Gd, Hf, Pu, U) - Aktinida (An) - Na, Fe
<i>Brannerite</i> b)		
<i>Freudenber gite</i> c)		
a) Turunan <i>Zirconolite</i> dengan penggantian Zr oleh A (Gd, Hf, Pu, U). b) Turunan <i>Perovskite</i> dengan penggantian Ca oleh An (Aktinida). c) Turunan <i>Hollandite</i> dengan penggantian Ba, (Al,Ti) oleh Na dan Fe.		

imobilisasi LCAT yang ditimbulkan dari teknik olah- ulang materi bakar nuklir sisa . Fase-fase penyusun *Synroc -C* (sebagai *Synroc Standar*) yang mengandung 20 % berat kotoran aktivitas tinggi dan radionuklida yang masuk ke dalam kisi-kisi berbagai fase mineral yang ada ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Paduan dan mineralogi *Synroc-C* (*Synroc Zirkonolit-Titanat* sebagai *Synroc Standar*) mempunyai kandunagn 20 % berat kotoran aktifitas tinggi [6].

Fase mineral	% berat	Radionuklida dalam kisi fase mineral
a.Fase Utama :		
<i>Hollandite</i> , $Ba(Al,Ti)_2Ti_6O_{16}$	30	- Cs dan Rb.
<i>Zirconolite</i> , $CaZrTi_2O_7$	30	- Logam tanah jarang dan aktinida.
<i>Perovskite</i> , $CaTiO_3$	20	- Sr, logam tanah Jarang, dan aktinida.
b.Fase Minor :	5	
Titan Oksida	5	
Fase paduan		- Tc, Pd, Rh, Ru, dll.
Fase Oksida logam lain		

Tabel 2. Fase-fase turunan dalam mineral *Synroc-C* (*Synroc Standar*) dan radionuklida yang menjadi penyusun fase mineral [6,9].

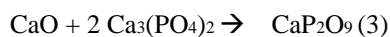
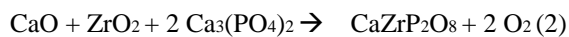
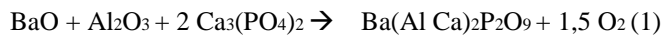
Dikembangkannya material *Synroc Zirkonolit-Titanat* agar dapat membentuk fase turunan dari fase inti yang terdapat berbagai faktor pada kotoran , yaitu : *Pyrochlore* ($CaATi_2O_7$, A = Gd, Hf, Pu, dan U) yang merupakan turunan *Zirconolite* dengan menambahkan faktor penyerap neutron (Hf dan Gd) untuk mencegah terjadinya

kritikalitas, *Brannerite* (AnTi_2O_6 , An = aktinida), dan *Freudenbergite* ($\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{Ti}_6\text{O}_{16}$). Fase-fase turunan mineral *synroc* titanat dan radionuklida penyusunnya ditunjukkan pada Tabel 2.

Percobaan melalui proses karakteristik pada blok *Synroc* menghasilkan Zirkonolit-Titanat kotoran yang dilakukan oleh ANSTO (Australia) dengan memanfaatkan teknik pres-panas isostatik pada temperatur tinggi (1200 °C) menghasilkan berat jenis berkisar antara 2,1-3,4 g/cm³, yaitu tergantung jenis kotoran (kandungan radionuklida) dan tingkat muat kotoran (*waste loading*) [10]. *Synroc* Zirkonolit-Titanat mampu mengungkung lebih kuat untuk faktor radioaktif dengan nomor massa yang lebih tinggi (seperti uranium) dibanding dengan faktor-faktor ringan. Pada uji kecepatan pelindihan dipercepat dalam medium air pada temperatur 100 °C, kecepatan pelindihan uranium pada hari pertama sekitar $5,0 \times 10^{-4}$ g.cm⁻².hari⁻¹, setelah itu dengan drastis menurun dalam beberapa hari kemudian (10-30 hari) diawal kemudian secara bertahap *asymptotic* bergerak turun pada suatu harga minimum sekitar $5,0 \times 10^{-6}$ g.cm⁻².hari⁻¹ [11]. Kemampuan akhir dari perkembangan *Synroc* Zirkonolit-Titanat sangat baik apabila dimanfaatkan untuk imobilisasi kotoran yang mengandung uranium seperti yang akan dilakukan dalam penelitian ini. Berdasar Tabel 1 dan Tabel 2, uranium yang terkandung dalam kotoran akan terperangkap dalam fase *Zirconolite*, *Perovskite*, *Pyrochlore* dan *Brannerite*.

II.2. Imobilisasi Kotoran Dengan Bahan Matriks *Synroc* Zirkonolit-Fosfat

Imobilisasi dengan matriks *Synroc* Zirkonolit-Fosfat belum dikembangkan. Pada penelitian ini akan dikembangkan dengan matriks *Synroc* Zirkonolit-Fosfat dengan menggunakan Kalsium-Fosfat untuk menggantikan titan oksida sebagai salah satu komponen prekursor yang diharapkan lebih murah. Komposisi standar yang akan dicoba adalah (dalam % berat) adalah : Al_2O_3 (5,4); BaO (5,6); CaO (11,0); $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (71,4) dan ZrO_2 (6,6). Beberapa pembentukan fase-fase utama mineral *Synroc* Zirkonia-fosfat yang diperkirakan terjadi pada temperatur tinggi sekitar 1200 °C dengan reaksi sebagai berikut :



Kemudian juga diperkirakan terbentuk fase-fase turunan yaitu antara lain CaAP_2O_8 (A=Pu, U, Gd, Hf), AnP_2O_9 (An=aktinida), dan $\text{Na}_2\text{Fe}_2\text{P}_2\text{O}_9$. Radionuklida dalam kotoran akan terperangkap dalam kisi-kisi fase mineral dan bahkan ada beberapa sebagai penyusun fase sebagai fase turunan.

II.3. Imobilisasi Kotoran Dengan Bahan matriks *Synroc* Silikonolit-Titanat

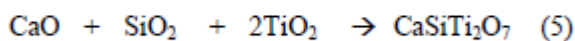
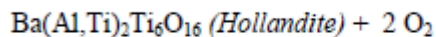
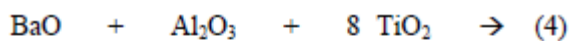
Pada penelitian ini digunakan kotoran Abu Terbang Batubara (ATB) sebagai salah satu bahan matrik. Komposisi kotoran Abu Terbang Batubara yang digunakan sebagai bahan matriks *synroc* ditunjukkan pada Tabel 3. Berdasar komposisi kotoran ATB tersebut, menunjukkan adanya oksida mayor yaitu SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 . Selain itu terdapat oksida minor yaitu CaO, TiO_2 , MnO_2 , K_2O , dan Na₂O. Kandungan faktor atau oksida lain yang kadarnya sangat rendah (sebagai pengotor) yang kadarnya dalam orde ppm (*part per million*) adalah Ba, Cr, Hg, Ni, Sr, Cu, Pb, V, dan Zn (tidak dicantumkan dalam Tabel 3). Dengan mengacu pada komposisi matriks *Synroc* Standar, seperti yang telah dikemukakan di atas, maka kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 cukup tinggi sebagai matriks utama. Kandungan SiO_2 dapat berperan sebagai pengganti ZrO_2 untuk membentuk *Synroc* Silikonolit-Titanat, sedang untuk membentuk *Synroc* Silikonolit-Titanat perlu penambahan TiO_2 sebagai matriks utama. Prekursor oksida lain yang perlu ditambahkan untuk menyesuaikan komposisi matriks *Synroc* Standar adalah BaO dan CaO.

Tabel 3. Komposisi Kotoran Abu Terbang Batubara (ATB) [12]

No	Kandungan Oksida	Konsentrasi Dalam Abu Terbang Batubara (%)
1	SiO ₂	35,44
2	Al ₂ O ₃	36,54
3	CaO	5,26
4	BaO	-
5	TiO ₂	0,66
6	Fe ₂ O ₃	20,32
7	MnO ₂	0,20
8	K ₂ O	1,15
9	Na ₂ O	0,43

Selain kandungan oksida-oksida tersebut terdapat pula kandungan oksida dari Ba, Cr, Hg, Ni, Sr, Cu, Pb, V, dan Zn dalam orde ppm (*part per million*).

Pada penelitian ini akan dikembangkan dengan matriks *Synroc* Silikonolit-Titanat, matriks ini tidak menggunakan zirkonium oksida (ZrO₂) sebagai salah satu komponen prekursor dan diganti dengan SiO₂ yang terkandung di dalam bahan matriks ATB, sehingga diharapkan lebih murah. Dengan penambahan prekursor oksida tambahan yaitu BaO, CaO dan TiO₂ ke dalam bahan matriks ATB maka komposisi prekursor oksida yang akan dicoba disesuaikan dengan komposisi *Synroc* Standar (dalam % berat) ditunjukkan pada Tabel 2. Komposisi prekursor oksida utama pembentuk *Synroc* Silikonolit-Titanat adalah : Al₂O₃, BaO, CaO, TiO₂ dan SiO₂. Beberapa pembentukan fase-fase utama mineral *Synroc* Silico-Titanat yang diperkirakan terjadi pada temperatur tinggi sekitar 900-1300 oC dengan reaksi sebagai berikut [6] :

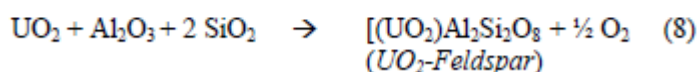
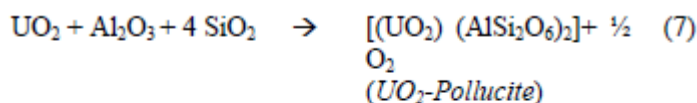


(*Siliconolite*)



(*Perovskite*)

Fase-fase turunan dari *Siliconolite* dan dari *Perovskite* yang akan terbentuk diperkirakan yaitu antara lain AnTi₂O₆ (An = aktinida), CaATi₂O₇ (A=Pu, U, Gd, Hf), dan Na₂Fe₂Ti₆O₁₆. Selain itu terbentuk pula fase-fase baru karena adanya SiO₂, fase-fase baru tersebut antara lain adalah *UO₂-Pollucite* : [(UO₂)(AlSi₂O₆)₂] dan *UO₂-Feldspar* [(UO₂)Al₂Si₂O₈], melalui reaksi [6] :



Kandungan Na₂O dan Fe₂O₃ dalam *synroc* dengan ATB akan memungkinkan terbentuknya fase *Freundenbergite* (Na₂Fe₂Ti₆O₁₆). Adanya kandungan K₂O dan Na₂O dapat menurunkan titik lebur dan dapat menurunkan temperatur pemanasan [13]. Radionuklida dalam kotoran akan terperangkap dalam kisi-kisi fase mineral dan bahkan ada beberapa sebagai penyusun fase sebagai fase turunan. Adanya fase-fase tersebut perlu diidentifikasi

dengan analisis mikrostruktur. Teknologi pembentukan blok *synroc* kotoran yang telah dikembangkan di Australia, Amerika Serikat, Inggris, dan Jepang adalah dengan pres-panas isostatik atau *hot isostatic pressing* (HIP). Proses HIP ini memerlukan alat pres-panas temperatur tinggi. Salah satu alternatif proses lain adalah melalui proses pemanasan temperatur tinggi tanpa pres-panas dan proses ini telah dipelajari di *Lawrence Livermore National Laboratory* [13].

Pada penelitian ini dipelajari imobilisasi kotoran *sludge* yang mengandung uranium dengan tiga jenis matriks yaitu *Synroc* Zirkonolit-Titanat, *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, dan *Synroc* Silikonolit-Titanat (menggunakan ATB). Imobilisasi dilakukan melalui proses pres-dingin dilanjutkan pemanasan pada temperatur tinggi (900-1300 °C, selama 3 jam) menggunakan tungku pemanas. Kualitas hasil imobilisasi ditentukan dengan melakukan uji karakteristik blok *synroc* yang meliputi uji densitas, uji kuat tekan, dan uji kecepatan pelindihan uranium dipercepat dalam medium air pada temperatur 100 °C.

METODE

III.1. Bahan Dan Peralatan Penelitian

Bahan yang digunakan : bahan prekursor oksida (Al_2O_3 , BaO, CaO, $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, dan ZrO_2), Abu Terbang Batubara (ATB), Uranil Nitrat Heksahidrat (UNH), bahan kimia pendukung HNO_3 , NaOH, Arsenazo-III (semua bahan kimia buatan E.Merk dengan kualitas p.a) aquades atau air bebas mineral, dan kotoran *sludge* yang mengandung uranium yang ditimbulkan dari dekomisioning sarana Pengolahan Asam Fosfat – Petrokimia Gresik (PAF-PKG). Peralatan yang digunakan : kompor listrik (*Hot Plate*), tungku pemanas (*Furnace*), alat uji tekan *Bullocks*, alat uji kecepatan pelindihan (*Soxhlet*), pH meter, Spektrofotometer UV-VIS *Lambda 35 Perkin Elmer*, Voltameter, timbangan elektrik, jangka sorong *Krisbow Digital*, cetakan blok kotoran, alat rolling *Gardco LabMill 8000*, dan alat gelas laboratorium.

III.2. Penyiapan Kotoran

Sejumlah 200 ml kotoran *sludge* yang mengandung uranium (dari dekomisioning sarana PAF-PKG) dikeringkan sehingga diperoleh serbuk kotoran padat kurang lebih sebanyak 100 g. Berdasarkan hasil analisis dengan metode Voltameteri diperoleh kandungan uranium dalam kotoran *sludge* sebesar 25.977 ppm (setara dengan $2,85 \times 10^5$ Bq/liter atau sama dengan $7,71 \times 10^{-3}$ Ci/m³ sehingga termasuk kotoran aktivitas rendah), sedang hasil analisis kandungan uranium dalam serbuk hasil pengabuan kotoran *sludge* adalah 59.080 ± 209 ppm.

III.3. Pembuatan Blok *Synroc* Kotoran

Bahan prekursor oksida sebagai bahan matriks untuk *Synroc* Zirkonolit-Titanat yang terdiri campuran oksida dengan komposisi (dalam % berat) adalah : Al_2O_3 (5,4), BaO (5,6), CaO (11); TiO_2 (71,4), ZrO_2 (6,6). Dengan cara yang sama dibuat bahan prekursor oksida sebagai bahan matrik untuk *Synroc* Zirkonolit-Fosfat yang terdiri campuran oksida dengan komposisi (dalam % berat) adalah : Al_2O_3 (5,4), BaO (5,6), CaO (11); $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ (71,4), ZrO_2 (6,6). Kemudian juga dengan cara yang sama dibuat bahan prekursor sebagai bahan matrik untuk *Synroc* Silikonolit-Titanat yang terdiri campuran dengan komposisi (dalam % berat) adalah : ATB (18) ; CaO (10,1) ; BaO (5,6) ; dan TiO_2 (71,3).

Dibuat campuran kotoran dengan masing-masing ketiga bahan prekursor oksida tersebut di atas sehingga diperoleh campuran masing-masing dengan tingkat muat kotoran 30 % berat kotoran kering, kemudian diaduk hingga homogen. Campuran tersebut dikeringkan pada temperatur 100 °C selama 30 menit dilanjutkan proses kalsinasi dalam *furnace* pada temperatur 750 °C selama 30 menit. Serbuk kemudian dicetak dan dipres dalam alat cetakan, hasil cetakan dilepas dari cetakan kemudian dilakukan proses pemanasan temperatur tinggi dengan variasi temperatur 900 -1300 °C selama 3 jam. Masing-masing blok kotoran hasil proses imobilisasi dilakukan pengujian densitas, kuat tekan, dan kecepatan pelindihan uranium, sehingga diperoleh proses pemanasan yang optimum untuk mendapatkan kualitas blok *synroc* kotoran yang terbaik.

III.4. Pengujian Blok Synroc Kotoran

Masing-masing blok kotoran hasil proses imobilisasi dilakukan pengujian densitas, kuat tekan, dan kecepatan pelindihan uranium yaitu kecepatan pelindihan dipercepat dalam medium air pada temperatur 100 °C menggunakan alat uji kecepatan pelindihan (*Soxhlet*) [14,15], sehingga diperoleh kualitas blok *synroc* kotoran yang terbaik.

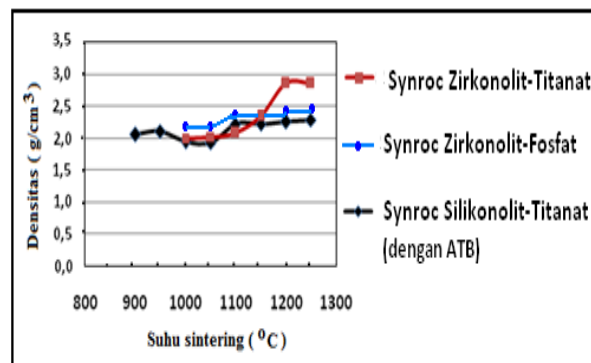
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perbandingan komposisi precursor oksida sebagai bahan matrik dari ketiga jenis *synroc* tersebut ditunjukkan pada Tabel 4. Dari perbandingan komposisi tersebut dapat diketahui bahwa ketiga jenis *Synroc* tersebut mempunyai komposisi oksida (Al₂O₃, BaO; CaO) relatif sama, sehingga yang membedakan adalah TiO₂ pada *Synroc* Zirkonolit-Titanat yang perannya digantikan Ca₃(PO₄)₂ pada *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, dan ZrO₂ pada *Synroc* Zirkonolit-Titanat yang perannya digantikan SiO₂ pada *Synroc* Silikonolit-Titanat yang menggunakan ATB. Fase-fase mineral untuk jenis *Synroc* Zirkonolit-Titanat (*Synroc* Standar) ditunjukkan pada Tabel 1 dan Tabel 2. Sedang untuk jenis *Synroc* Zirkonolit-Fosfat ditunjukkan pada persamaan (1) sampai (3), dan untuk *Synroc* Silikonolit-Titanat yang menggunakan ATB ditunjukkan pada persamaan (4) sampai (8). Kandungan Na₂O dan Fe₂O₃ dalam *synroc* Silikonolit-Titanat (yang menggunakan ATB) juga akan memungkinkan terbentuknya fase *Freudenbergite* (NaFe₂Ti₆O₁₆). Adanya kandungan K₂O dan Na₂O dapat menurunkan titik lebur dan dapat menurunkan temperatur pemanasan.

Tabel 4. Perbandingan komposisi prekursor oksida bahan matriks *Synroc* Zirkonolit-Titanat, *Synroc* Zirkonolit-Fosfat dan *Synroc* Silikonolit-Titanat.

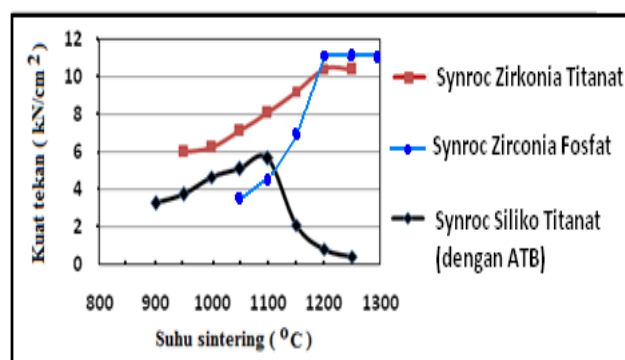
Oksida	Komposisi Prekursor Oksida Dalam Matriks <i>Synroc</i>		
	<i>Synroc</i> Zirkonolit Titanat,	<i>Synroc</i> Zirkonolit Fosfat,	<i>Synroc</i> Silikonolit Titanat,
	Titanat, (%)	(%)	(%) *)
SiO ₂	-	-	6,07
Al ₂ O ₃	5,4	5,4	6,26
CaO	11,0	11,0	10,52
BaO	5,6	5,6	5,33
TiO ₂	71,4	-	68,02
Ca ₃ (PO ₄) ₂	-	71,4	-
ZrO ₂	6,6	6,6	-
Fe ₂ O ₃	-	-	3,48
MnO ₂	-	-	0,04
K ₂ O	-	-	0,20
Na ₂ O	-	-	0,08
Jumlah	100,00	100,00	100,00
*) Menggunakan ABT sebagai prekursor oksida (sebagai sumber SiO ₂).			

Hasil pengukuran densitas, kuat tekan, dan kecepatan pelindihan uranium pada ketiga sampel blok *synroc* kotoran dengan tingkat muat kotoran 30 % berat dan waktu pemanasan 3 jam [16,17] untuk variasi temperatur 900-1300 °C ditunjukkan pada Gambar 1, 2, dan 3.



Gambar 1 . Pengaruh temperatur pemanasan terhadap densitas blok *synroc* kotoran (tingkat muat kotoran 30 % dan waktu pemanasan 3 jam)

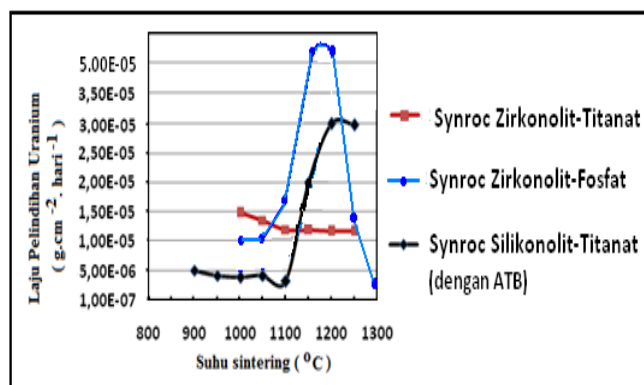
Pada Gambar 1 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan nilai densitas untuk ketiga jenis blok *synroc* kotoran tersebut relatif makin meningkat. Hal ini karena semakin tinggi temperatur berarti energi panas yang diberikan selama proses pemanasan semakin besar. Pemberian energi yang semakin besar menyebabkan terjadinyadifusi dan pembentukan fase-fase mineral *synroc*, serta pertumbuhan dan pengaturan butir fase-fase mineral *synroc* juga semakin cepat dan makin sempurna, sehingga pori-pori antar butir semakin berkurang. Setelah proses pemanasan blok *synroc* kotoran terjadi penyusutan volume karena terbentuk suatu keramik multi-fase yang padat dan kompak sehingga nilai densitasnya semakin meningkat dengan makin tingginya temperatur pemanasan. Percobaan dihentikan sampai temperatur 1300 °C, karena pada temperatur ≥ 1400 °C blok *synroc* meleleh dan lengket dengan cawan. Selain itu menurut Stewart [13] dinyatakan bahwa proses pembentukan optimal untuk *synroc* standar dapat dicapai pada temperatur ~ 1200 °C. Pada Gambar 1 ditunjukkan pula bahwa pada temperatur 1200 °C densitas blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat sebesar 2,85 g/cm³ yaitu relatif lebih besar dari pada kedua blok *synroc* kotoran yang lain. Pada kondisi optimum untuk blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat diperoleh pada temperatur pemanasan 1200 °C dengan harga densitas yaitu sebesar 2,52 g/cm³. Kondisi optimum untuk blok *Synroc* Silikonolit-Titanat diperoleh pada temperatur pemanasan 1100 °C dengan harga densitas yaitu sebesar 2,28 g/cm³. Pengaruh temperatur pemanasan terhadap kuat tekan blok *synroc* kotoran ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 . Pengaruh temperatur pemanasan terhadap kuat tekan blok *synroc* kotoran (tingkat muat kotoran 30 % dan waktu pemanasan 3 jam)

Pada Gambar 2 menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur pemanasan, nilai kuat tekan untuk ketiga jenis blok *synroc* kotoran tersebut relatif makin meningkat kemudian menuju titik optimum. Pada kondisi optimum kuat tekan blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat (11,36 kN/cm² pada temperatur pemanasan 1200 °C) relatif lebih besar dari pada kuat tekan *Synroc* Zirkonolit-Titanat (10,98 kN/cm² pada temperatur pemanasan 1200 °C), hal ini menunjukkan bahwa peran Ca₃(PO₄)₂ yang menggantikan TiO₂ memberikan pengaruh lebih kuat terhadap kekompakan fasa *synroc*

yang terbentuk. Sedangkan kuat tekan Blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat (10,98 kN/cm² pada temperatur pemanasan 1200 °C) jauh lebih besar daripada blok *Synroc* Silikonolit-Titanat (5,57 kN/cm² pada temperatur pemanasan 1100 °C), hal ini menunjukkan bahwa peran TiO₂ yang digantikan SiO₂ memberikan pengaruh lebih kuat terhadap kekompakan fasa *synroc* yang terbentuk. Selain itu sesuai dengan fenomena peningkatan densitas pada Gambar 1, bahwa kenaikan temperatur pemanasan akan menaikkan densitas dan juga kuat tekan blok *synroc* kotoran. Dalam hal ini temperatur pemanasan untuk blok *Synroc* Silikonolit-Titanat optimum pada temperatur 1100 °C, yaitu lebih rendah daripada temperatur optimum blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat yaitu 1200 °C. Hal ini diperkuat pula adanya pengaruh kandungan K₂O dan Na₂O yang dapat menurunkan titik lebur *synroc* dan dapat menurunkan temperatur pemanasan. Fenomena yang terjadi terhadap penurunan kuat tekan blok *Synroc* Silikonolit-Titanat setelah temperatur pemanasan > 1100 °C menunjukkan adanya beberapa komponen penyusun terutama oksida logam alkali yang mempunyai titik lebur rendah lepas dan meninggalkan pori-pori *synroc* yang mengakibatkan terjadinya penurunan kuat tekan. Selanjutnya pengaruh temperatur pemanasan terhadap kecepatan pelindihan uranium blok *synroc* kotoran ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Pengaruh temperatur pemanasan terhadap laju pelindihan uranium (pada medium air 100 °C) dari blok *synroc* kotoran (tingkat muat kotoran 30 %, waktu pemanasan 3 jam).

Pada Gambar 3 menunjukkan bahwa makin tinggi temperatur pemanasan, kecepatan pelindihan uranium dari blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat kotoran semakin menurun. Hal ini seiring dengan meningkatnya densitas dan kuat tekan blok *synroc* kotoran (Gambar 1 dan Gambar 2), yaitu karena pembentukan fase-fase mineral *synroc* semakin sempurna dan terbentuk suatu keramik multi-fase yang padat dan kompak sehingga faktor-faktor dalam kotoran semakin terkungkung lebih kuat dan tidak mudah terlindih oleh air. Sedang untuk blok *Synroc* Silikonolit-Titanat (yang menggunakan ATB), penurunan kecepatan pelindihan uranium mencapai minimum pada temperatur pemanasan 1100 °C, kemudian meningkat pada temperatur pemanasan > 1100 °C. Hal ini seiring dengan adanya penurunan kuat tekan (Gambar 2) setelah temperatur pemanasan > 1100 °C, yaitu akibat adanya beberapa komponen (oksida logam alkali) yang lepas pada temperatur lebih tinggi sehingga menurunkan kekompakan *synroc* dan menurunkan sifat pengungkungannya terhadap uranium. Fenomena ini juga terjadi pada blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, namun terjadi penurunan kembali kecepatan pelindihan uranium setelah temperatur pemanasan > 1200 °C. Hal ini karena pada temperatur sangat tinggi mendekati titik leburnya menyebabkan pertumbuhan dan pengaturan butir fase-fase mineral *synroc* semakin cepat dan makin sempurna dan terbentuk suatu keramik multi-fase yang padat dan kompak sehingga kecepatan pelindihan uranium menurun, bahkan mencapai kecepatan pelindihan uranium terendah yaitu mencapai 2,70x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ pada temperatur pemanasan 1300 °C. Kondisi optimum (terbaik) blok *synroc* hasil imobilisasi kotoran radioaktif uranium menggunakan tiga jenis bahan matriks *synroc* tersebut ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Kondisi optimum blok *synroc* hasil imobilisasi kotoran *sludge* radioaktif yang mengandung uranium menggunakan bahan matriks *Synroc* Zirkonolit-Titanat, *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, dan *Synroc* Silikonolit-Titanat.

Parameter	Satuan	<i>Synroc</i> Zirkonolit Titanat	<i>Synroc</i> Zirkonolit Fosfat	<i>Synroc</i> Silikonolit Titanat *)
Tingkat Muat	Prosen (%)	30	30	30
Densitas	g/cm ³	2,85	2,48	2,28
Kuat Tekan	kN/cm ²	10,98	11,36	5,57
Laju lindih U	g.cm ⁻² .hari ⁻¹	1,17x10 ⁻⁵	2,70x10 ⁻⁶	1,05x10 ⁻⁶
Temperatur Pemanasan	°C	1200	1300	1100
Waktu Pemanasan	Jam	3	3	3

*) Menggunakan ABT sebagai prekursor oksida (sebagai sumber SiO₂).

Tingkat muat kotoran 30 % berat dan waktu pemanasan selama 3 jam merupakan kondisi optimum yang dicapai untuk ketiga jenis blok *synroc* kotoran tersebut [16,17]. Besarnya densitas untuk jenis blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat kotoran menunjukkan harga yang tertinggi. Sedangkan berdasarkan harga kuat tekan maka jenis blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat adalah yang terbaik. Kemudian berdasar kecepatan pelindihan uranium, kualitas blok *Synroc* Silikonolit-Titanat yang terbaik yaitu mempunyai harga terendah walaupun tidak berbeda jauh dengan kecepatan pelindihan jenis blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat, kedua jenis blok *synroc* kotoran tersebut lebih rendah (lebih baik) daripada blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat. Walaupun demikian kualitas ketiga jenis blok *synroc* kotoran dengan proses pemanasan ini sesuai dengan kualitas hasil blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat kotoran dengan proses pres-panas isostatik (sebagai standar) yang mempunyai densitas 2,1 – 3,4 g/cm³ [10] dan kecepatan pelindihan uranium antara 5,0x10⁻⁴ – 6,0x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ [15]. Kualitas hasil blok *synroc* kotoran tersebut juga memenuhi kualitas yang direkomendasikan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) yaitu kuat tekan 2-5 kN/cm² dan kecepatan pelindihan 1,7x10⁻¹ - 2,5x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹ [18]. Dengan demikian ketiga jenis *synroc* tersebut memenuhi persyaratan untuk digunakan. Berdasarkan kualitas blok *synroc* maka jenis *Synroc* Zirkonolit-Fosfat adalah pilihan yang terbaik, namun bila pertimbangan utama berdasarkan kondisi optimum dengan proses pemanasan dengan temperatur terendah dan dengan menggunakan bahan yang murah (ATB) maka pilihan jatuh pada jenis *Synroc* Silikonolit-Titanat.

KESIMPULAN

- Proses imobilisasi kotoran *sludge* yang mengandung uranium yang ditimbulkan dari dekomisioning Sarana Pengolahan Asam Fosfat-Petro Kimia Gresik menggunakan bahan matriks *synroc* pada tingkat muat 30 % berat kotoran melalui proses pemanasan temperatur tinggi selama 3 jam, diperoleh kualitas terbaik untuk ketiga jenis bahan matrik *synroc* adalah sebagai berikut :
 - untuk blok *Synroc* Zirkonolit-Titanat diperoleh pada temperatur pemanasan 1200 oC, dengan densitas 2,85 g/cm³, kuat tekan 10,98 kN/cm², dan kecepatan pelindihan uranium (pada medium air temperatur 100 oC) adalah 1,17x10⁻⁵ g.cm⁻².hari⁻¹,
 - untuk blok *Synroc* Zirkonolit-Fosfat diperoleh pada temperature pemanasan 1300 oC, dengan densitas 2,48 g/cm³, kuat tekan 11,36 kN/cm², dan kecepatan pelindihan uranium (pada medium air temperatur 100 oC) adalah 2,70x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹, dan

- c. untuk blok *Synroc* Siliconolit-Titanat diperoleh pada temperatur pemanasan 1100 oC, dengan densitas 2,28 g/cm³, kuat tekan 5,57 kN/cm², dan kecepatan pelindihan uranium (pada temperatur air 100 oC) adalah 1,05x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹.
2. Kualitas ketiga jenis blok *synroc* kotoran dengan proses pemanasan tersebut sesuai dengan kualitas hasil blok *Synroc* Zirkonia-Titanat kotoran dengan proses pres-panas isostastik (*Synroc* Standar) yang mempunyai densitas 2,1 – 3,4 g/cm³ [10] dan kecepatan pelindihan uranium 5,0x10⁻⁴ – 6,0x10⁻⁶ g.cm⁻².hari⁻¹ [15].
3. Kualitas ketiga jenis blok *synroc* kotoran tersebut juga memenuhi kualitas yang direkomendasikan oleh *International Atomic Energy Agency* (IAEA) yaitu kuat tekan 2-5 kN/cm² dan kecepatan pelindihan 1,7x10⁻¹ - 2,5x10⁻⁴ g.cm⁻².hari⁻¹ [18]. Dengan demikian ketiga jenis *synroc* tersebut memenuhi persyaratan untuk digunakan.
4. Berdasarkan kualitas blok *synroc* maka jenis *Synroc* Zirconolit-Fosfat adalah pilihan yang terbaik, namun bila pertimbangan utama berdasarkan kondisi optimum dengan proses pemanasan dengan temperatur terendah dan dengan menggunakan bahan yang murah (ATB) maka pilihan jatuh pada jenis *Synroc* Silikonolit-Titanat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Zainus Salimin, Gunandjar, dan Achmad Zaid, Pengolahan Kotoran Radioaktif Cair Organik Dari Kegiatan Dekomisioning Sarana Pengolahan Asam Fosfat Petrokimia Gresik Melalui Proses Oksidasi Biokimia, Seminar Nasional Teknologi Lingkungan VI, ITS, Surabaya, 10 Agustus 2009.
- [2] Manson Benedict, et.al, Nuclear Chemical Engineering, Second Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
- [3] Keputusan Kepala Bapeten No. 01/Ka-BAPETEN/V-99 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi, Jakarta, 1999.
- [4] Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. Kep.02/MENLH/1988 Tentang Pedoman Penetapan Baku Mutu Lingkungan, 1998.
- [5] Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir No. 02/Ka.Bapeten/V-99 Tentang Baku Tingkat Radioaktivitas Di Lingkungan, 1999.
- [6] Vance E.R., “*Status of Synroc Ceramics for HLW*”, *Proceedings of The 2nd Bianual Int. Workshop on HLRW Management*”, Dep. of Nuclear Engineering, Fac. of Engeneering, Gadjah Mada Univ., Yogyakarta, 1999.
- [7] Ringwood A.E., Kesson S.E., Ware N.G., Hibberson W., and Mayor A., *Immobilization of High Level Nuclear Reactor Wastes in Synroc*”, *Nature*, 278, 219-233, 1979.
- [8] Ringwood A.E., Kesson S.E., Reeve K.D., Levins D.M., and Ramm E.J., *Radioactive Wasteforms for the future*” (Eds W. Lutze and R.C. Ewing), Elsevier, Amsterdam, 233-334, 1988.
- [9] Ringwood A. E, et.al, *In Radioactive Waste Form for the Future*, Elsevier, (Eds W. Lutze and R.C. Ewing), North Holland, 233-334, 1988.
- [10] Levins DM and Jostsons A., *R&D in Radioactive Waste Management at ANSTO*, Regional Corporation in Asia, The 2nd Seminar on Radioactive Waste Management, Kuala Lumpur, Malaysia, October 14-18, 1996.
- [11] Ringwood A.E, Overby, V.M., Kesson, S.E., “*Synroc: Leaching Performance and Process Technology*,” *Proceedings of the International Seminar on Chemistry and Process Engineering for High Level Liquid Waste Solidification*, Julich, 1981.
- [12] Muhayatun, 2013, Laporan Hasil Pengujian Sampel Abu Batubara (*Fly-Ash* dan *Bottom-Ash*) dari PLTU Suralaya, Lab. PTNBR-BATAN Bandung, 10 Juli 2013.
- [13] Stewart M.W.A., *Pemanasan of Synroc*, Proc. Int. Ceramic Conference Austceram 94, Sydney, July 25-27, 1, p 301, 1994.
- [14] Martono H., *Characterization of Waste Glass and Treatment of High Level Liquid Waste*, Training Report on Treatment of HLLW and Characterzation of Waste Glass at Tokai Works, PNC, Japan, 1988.
- [15] Hespe, E.D., *Leach Testing of Immobilized Waste Solids, A Proposal for a Standar Method.*, Atomic Energy Review, 9, 1-12, 1971.
- [16] Gunandjar, Imobilisasi Kotoran Radioaktif Mengandung Uranium Menggunakan Bahan Matriks *Synroc* Titanat Dengan Proses Pemanasan Temperatur Tinggi, Prosiding PPI-PDIPTN, PTAPB-BATAN Yogyakarta, 2011.
- [17] Gunandjar, Titik Sundari, Yuli Purwanto, Imobilisasi Kotoran Radioaktif Uranium Dari Dekomisioning Sarana Pengolahan Asam Fosfat Menggunakan Bahan Matriks *Synroc* Titanat Dan Fosfat, Pertemuan Dan Presentasi Ilmiah-Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan teknologi Nuklir, PSTA-BATAN Yogyakarta, Tanggal 10-11 Juni 2014