

Pembentukan Gelas Keramik Litium Alumina Silikat (LAS) dari Zeolit Penjerap Radionuklida Pb²¹⁰ (Lithium Aluminium Silicate Glass Ceramic Forming From Zeolite Used As Pb²¹⁰ Radionuclide Adsorber)

Widya Rosita¹, I Made Bendiyasa², P. Sumardi²

¹ Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

² Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika No. 2 Yogyakarta 55281

Abstract

Some radioactive is classified according to radiotoxicity per unit activity. Pb²¹⁰ is classified as high toxicity radionuclide so waste contains this radionuclide should be handled carefully.

Natural zeolite is widely used in adsorption processes. The zeolite is used to adsorb hazardous material such as radionuclide, and then it is proceeded further to form glass-ceramic.

Natural zeolite contains basic oxides for forming glass, therefore it can be used as a raw material for glass and/or glass-ceramics. The three-step processes used in series were vitrification, glass sintering and crystallization.

Lithium Aluminium Silicate (LAS) glass was made from a mixture of zeolite, soft cullet (30%), Li₂SO₄.H₂O (13.832%), and TiO₂ (1.765%) through vitrification process held constantly at 1200°C for 4 hours. The sintering process was conducted at 650°C to 665°C with constant heating rate of 3°C/min. Shrinkage during the sintering process was measured using a dilatometer. The shrinkage rate was defined as the ratio of length changes to the initial length of sample. An X-Ray Diffraction Analyzer was used to identify the crystal phase formed at the end of the sintering process.

The sintering process resulted in maximum linear shrinkage of 5.6% at 660°C and formation of quartz crystal phase at the end of the process. Based on the proposed mathematical model, it was found that the overall activation energy was 773.3 kJ/mole and the maximum sintering time (t_b) as a function of T was $8.10^{-15} e^{(37577/T)}$ second.

Keywords: *natural zeolite, sintering process, lithium aluminium silicate glass ceramic, radionuclide.*

1. Pendahuluan

Dewasa ini, zeolit banyak digunakan sebagai media penjerap limbah. Setelah digunakan, kemudian zeolit tersebut diproses lebih lanjut dengan stabilisasi. Proses stabilisasi ini sangat penting bila limbah yang dijerap berupa bahan berbahaya termasuk bahan radioaktif.

Komponen utama penyusun zeolit alam adalah oksida-oksida gelas seperti SiO₂ (±70%) dan Al₂O₃ (±10%), oleh sebab itu zeolit berpotensi sebagai bahan baku pembuatan gelas

atau gelas keramik. Penambahan sedikit Litium (Li) sebelum zeolit mengalami proses peleburan, diharapkan dapat menghasilkan gelas Litium Alumina Silikat (LAS). Jika gelas ini dikenai proses sintering diharapkan dapat mengalami proses pemampatan (*densification*) dan akan terbentuk gelas keramik Litium Alumina Silikat (LAS) pada akhir proses *sintering*. Gelas keramik LAS memiliki koefisien ekspansi panas yang sangat kecil sehingga memiliki ketahanan yang sangat tinggi terhadap kejutan suhu.

Dalam penelitian ini dipelajari kondisi proses *sintering* serta mekanisme pemampatan (*densification*) yang terkait dengan proses *sintering* gelas LAS dari zeolit alam yang berasal dari Sukabumi, Jawa Barat.

Tinjauan pustaka

Gelas yang digunakan pada preparasi gelas keramik biasanya berupa oksida gelas inorganik, yang dibuat dengan cara pendinginan leburan gelas, kemudian dilanjutkan dengan perlakuan suhu terkontrol sehingga terbentuk kristal selain itu gelas keramik juga dapat dibuat melalui proses *sintering*. Pada proses *sintering*, bubuk gelas tersebut dicampur dengan bahan pengikat yang kemudian dibentuk dengan cara ditekan lalu dilanjutkan dengan perlakuan panas terkontrol yang menyebabkan terjadinya *sintering* dan kristalisasi (Strnad, 1986). Teknik ini akan mereduksi suhu proses sehingga dapat menghemat biaya (Rabinovich, 1982).

Pengaruh kecepatan pemanasan terhadap proses pemampatan dan kristalisasi telah dilakukan oleh Boccacini, dkk. (1996) yang menggunakan gelas barium magnesium alumina silikat serta oleh Yekta dan Marghussian (1999) yang menggunakan β -quartz solid solution dan gelas Gahnite

Penentuan energi aktivasi difusi telah dilakukan oleh Sabioni, dkk (1998) yang melakukan penelitian mengenai difusi oksigen dalam gelas Cordierite ($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$).

2. Fundamental

Zeolit alam yang terdapat di Indonesia umumnya terdiri dari jenis klinoptilolit dan mordenit yang tersusun atas SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , H_2O dengan SiO_2 dan Al_2O_3 sebagai oksida yang dominan. Bahan dengan kandungan SiO_2 dan Al_2O_3 melebihi 85% akan memiliki suhu lebur di atas 1650°C (Strnad, 1986). Penurunan suhu lebur bahan dapat dilakukan dengan menambahkan oksida-oksida golongan alkali dan alkali tanah. Dengan penambahan Li_2O , zeolit alam dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan gelas LAS

Pada penelitian ini akan dipelajari mekanisme *sintering* gelas LAS. Adapun model matematis yang diajukan untuk mengevaluasi hasil percobaan adalah model yang diajukan oleh Kingery dan Berg (Kingery, 1959) yang menyusun model matematik dengan asumsi transfer *vacancy* dari leher (*neck*) ke batas butir (*grain boundary*), tidak terjadi *compressive stress* di batas butir (*grain boundary*) dan *surface tension* di leher (*neck*), butir berbentuk bola, campuran gelas homogen, dan penyusutan arah radial diabaikan. Oleh karena itu besarnya *rate of shrinkage* dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{5}{16\sqrt{2}} \frac{D^* \cdot \gamma \cdot a^3}{k_b T} \right)^{2/5} r^{-6/5} t^{2/5} \quad (1)$$

Jika didefinisikan sebuah tetapan baru (α), yang merupakan gabungan tetapan D^* dan γ' sebagai berikut:

$$\alpha = D^* \cdot \gamma' \quad (2)$$

dengan

$$\gamma' = \gamma \cdot a^3 \quad (3)$$

maka persamaan (1) menjadi

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \left(\frac{5}{16\sqrt{2}} \frac{\alpha}{k_b T} \right)^{2/5} r^{-6/5} t^{2/5} \quad (4)$$

Nilai tetapan α dipengaruhi oleh suhu. Persamaan (4) berlaku untuk kondisi dimana belum terjadi pembentukan kristal sehingga diperlukan nilai waktu batas (t_b) antara proses *sintering* dan proses kristalisasi pada berbagai suhu sinter.

Hipotesis

Berdasarkan landasan teori yang diajukan maka sistem Litium Alumina Silikat dapat dibentuk dari zeolit alam Sukabumi yang telah digunakan untuk menjerap limbah simulasi yang mengandung Pb radioaktif, peristiwa penyusutan (*shrinkage*) dapat terjadi pada proses *sintering* gelas LAS dari limbah zeolit sebagai bahan baku dan kecepatan penyusutan gelas LAS dapat didekati oleh model matematis yang diajukan.

3. Metodologi

Bahan

- a) Zeolit alam Sukabumi tersusun atas oksida-oksida: SiO₂ 66,34 %, Al₂O₃ 12,22%, Fe₂O₃ 1,56%, CaO 2,56%, MgO 0,73%, Na₂O 1,59%, K₂O 2,11%, MnO 0,03%, TiO₂ 0,11 %, P₂O₅ 0,02%, H₂O 3,85%.
- b) Kulet (gelas bekas) lunak berupa serpihan dan pecahan, dengan komposisi oksida: SiO₂ 34,94%, Al₂O₃ 1,8%, Fe₂O₃ 0,18%, CaO 9,85%, MgO 5,4%, Na₂O 13,28%, K₂O 0,45%, MnO 0,008%, TiO₂ 0,05%, P₂O₅ 0,02%.
- c) Bubuk Li₂SO₄.H₂O, M = 127,95 g/mol, Kemurnian minimum 99%
- d) Bubuk TiO₂, M = 79,90 g/mol, Kemurnian minimum 99%
- e) Bubuk Pb (C₂H₃O₂)₂.3H₂O, M = 379,35 g/mol, kemurnian minimum 99%
- f) Larutan Sodium Silikat, ρ = 1,37 kg/l
- g) Vaseline

Alat

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *Furnace Carbolite 1600°C*, *Ceramic Crucible*, *Carver Laboratory Press*, Cetakan dari *stainless steel* berukuran D = 10 mm, L = 80 mm, Dilatometer 410 EP, *Differential Thermal Analyzer* (DTA), *Atomic Absorption Spectrophotometer* (AAS) *Analyzer*, *X-Ray Diffractometer*

Jalan penelitian

Limbah simulasi yang mengandung Pb radioaktif dibuat dari kristal timbal asetat yang dilarutkan dalam aquades. Pada penelitian ini tidak divariasikan konsentrasi limbah Pb, hanya diambil satu nilai konsentrasi yaitu sebesar 200 ppm. Bubuk zeolit yang telah jenuh menyerap Pb tersebut lalu dicampur dengan kulet lunak (fluks), Li₂SO₄.H₂O dan TiO₂ kemudian dilebur pada suhu 1200°C dengan kecepatan pemanasan 5°C/menit selama 4 jam. Hasil leburan kemudian *quenched* untuk membentuk fase gelas, yang kemudian dihancurkan kembali sehingga

berukuran -200 mesh +325 mesh, dicampur dengan larutan sodium silikat sebagai pengikat dan dimasukkan ke dalam cetakan *stainless steel* yang telah dilapisi vaselin lalu ditekan. Silinder padat yang terbentuk kemudian dipanaskan di dalam dilatometer dengan kecepatan pemanasan 3°C/menit menuju suhu sinter. Suhu sinter dijaga tetap selama 75 menit dan setiap 5 menit dilakukan pencatatan perubahan panjang (ΔL) yang dapat dibaca langsung dari monitor yang ada pada dilatometer kemudian laju pengkerutan (*shrinkage*) dihitung dengan cara membandingkan antara perubahan panjang yang terjadi dengan panjang sampel saat awal sinter. Untuk membuktikan bahwa dapat dibentuk gelas keramik dengan basis sistem LAS, maka pada akhir proses sinter dilakukan analisis jenis kristal menggunakan XRD *analyzer* terhadap sampel yang telah dikenai proses *sintering*.

4. Hasil dan Pembahasan

Untuk keperluan pembentukan gelas keramik LAS maka ke dalam campuran padat zeolit dan kulet lunak perlu penambahan Li₂O serta TiO₂ sebagai pembantu pembentuk inti kristal. Pada penelitian ini dipelajari 2 cara penambahan Li₂O yaitu mengacu pada komposisi LAS Strnad (Strnad, 1986) dan komposisi stoikiometris fase kristalin *β-spodumene* (Li₂O.Al₂O₃.4SiO₂) dengan basis perhitungan kandungan Al₂O₃ dalam campuran padat zeolit-kulet. Berdasarkan kedua jenis penambahan Li₂O dan TiO₂, setelah dilakukan peleburan dan proses *sintering* pada suhu 850°C, ternyata hanya komposisi secara stoikiometris yang berhasil membentuk gelas keramik LAS dengan jenis kristal yang terbentuk adalah *β-spodumene* (Li₂O.Al₂O₃.4SiO₂), dengan intensitas tertinggi pada kadar kulet lunak 30% sehingga pada penelitian ini digunakan penambahan Li₂O secara stoikiometris dengan kadar kulet lunak sebesar 30% berat dari campuran padat zeolit-kulet lunak.

Untuk mengetahui kisaran suhu sinter kemudian dilakukan analisis menggunakan *Differential Thermal Analyzer* (DTA), dengan kecepatan pemanasan 3°C/menit, dimana suhu

sinter diambil antara suhu *dilatometric softening point* dan suhu kristalisasi yaitu antara 648,9°C - 666,2°C. Untuk penelitian ini diambil kisaran suhu sinter antara 650°C - 665°C. Setelah diperoleh komposisi yang relatif baik dan kisaran suhu sinter, kemudian dilakukan penelitian terhadap perbandingan L_0/d sampel yang akan digunakan dalam proses *sintering*. Dalam hal ini diinginkan L_0/d sampel yang minimal untuk menghindari terjadinya *fraksional shrinkage* akibat variasi tekanan pada *compact powder*. Dari hasil penelitian diperoleh hasil bahwa L_0/d sampel yang baik sebesar 2,8.

Hasil proses *sintering* menunjukkan bahwa terjadi penyusutan selama proses *sintering* berlangsung yang kemudian berlanjut membentuk kristal pada waktu yang panjang. Pada saat mulai terbentuk fase kristal maka proses penyusutan akibat *sintering* dapat diabaikan atau dengan kata lain, proses pemampatan sudah berakhir. Jika waktu pemanasan diperpanjang maka jumlah fase kristal yang terbentuk akan semakin banyak. Selanjutnya untuk proses penyusutan yang terjadi, dilakukan analisis terhadap data-data pada kisaran suhu 650°C sampai 665°C dimana belum terbentuk garis mendatar.

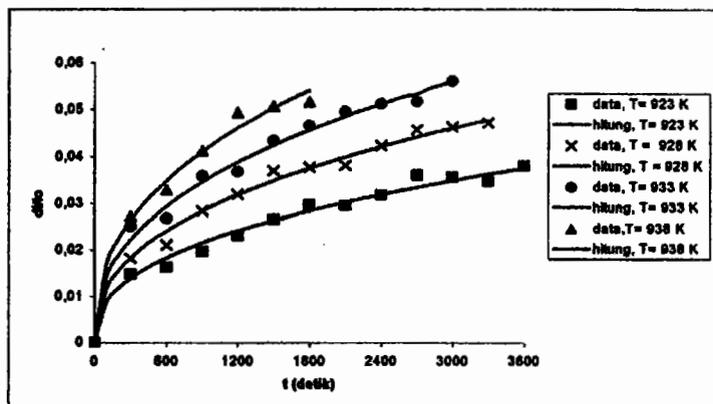
Berdasarkan model yang diajukan dapat diperoleh nilai tetapan gabungan difusi - *surface energy* (α), yang dievaluasi dengan metoda optimasi Golden section berdasarkan data $\Delta L/L_0$ hasil penelitian. Hasil optimasi terhadap tetapan tersebut dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Nilai tetapan hasil optimasi

(Kadar kulet lunak = 30%, kecepatan pemanasan = 3°C/menit)

Suhu (K)	α (J. cm ³ /s).10 ³⁴	t_b , detik
923	7,25	3600
928	14,58	3300
933	23,93	3000
938	36,91	1800

Pada Gambar 1 terlihat bahwa penyusutan berlangsung cepat pada tahap awal. Hal ini terjadi karena pada tahap awal, konsentrasi *vacancy* di daerah lengkung (*lenticular surface*) sangat besar akibat adanya permukaan cekung, sehingga banyak *vacancy* yang berdifusi menuju ke batas butir yang permukaannya relatif datar sedang atom berdifusi ke arah yang berlawanan membentuk daerah leher (*neck*). Dengan berjalannya waktu, kecekungan permukaan di daerah leher (*neck*) cenderung berkurang sehingga jumlah *vacancy* yang berdifusi juga semakin berkurang sehingga kecepatan pembentukan daerah leher (*neck*) juga cenderung melambat, akibatnya laju penyusutan ($\Delta L/L_0$) akan berkurang. Selain itu melambatnya pembentukan daerah leher (*neck*) juga disebabkan pengaturan kembali letak atom-atom di bagian dalam butir gelas, mengisi daerah kosong yang telah ditinggalkan atom yang sebelumnya mengisi tempat tersebut dan mulai mengatur posisi membentuk struktur yang khas, yang lambat laun akan membentuk struktur yang berulang. Saat dimana banyak terbentuk struktur yang berulang, maka saat itu mulai terbentuk fase kristalin. Pada Gambar 1, terlihat bahwa semakin tinggi suhu maka semakin cepat tercapai tahap kristalisasi.



Gambar 1. Hubungan penyusutan ($\Delta L/L_0$) dengan waktu sinter (t) (jika t diambil antara 0- t_b)

Hasil optimasi menunjukkan bahwa dengan naiknya suhu maka tetapan gabungan difusi - *surface energy* (α) semakin besar. Bila perubahan nilai tetapan tersebut terhadap suhu berbentuk eksponensial, maka tetapan tersebut dalam fungsi suhu dapat dinyatakan dengan persamaan (5)

$$\alpha = 5.10^{10} \exp\left[\frac{-773,278}{k_b T}\right] \quad (5)$$

Pada persamaan (5) terlihat bahwa energi aktivasi gabungan (E_3) sebesar 773,278 kJ/mol. Energi aktivasi gabungan (E_3) ini merupakan penjumlahan energi aktivasi difusi (E_1) dan energi aktivasi ikatan (E_2). Sabioni, dkk (1988) telah melakukan penelitian tentang difusi dalam gelas *Cordierite* dengan energi aktivasi difusi sebesar 481 kJ/mol. Jika dianggap bahwa besarnya energi aktivasi difusi pada gelas LAS berada pada kisaran harga di atas, berarti besarnya energi aktivasi ikatan sekitar 300 kJ/mol. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *surface energy* terhadap proses penyusutan tidak dapat diabaikan. Nilai energi aktivasi ikatan yang lebih kecil daripada nilai energi aktivasi difusi ini menunjukkan bahwa sebelum terjadi peristiwa difusi, terlebih dahulu terjadi pemutusan ikatan antar atom sehingga memudahkan atom-atom tersebut untuk berdifusi. Hubungan tetapan tersebut terhadap suhu dapat dilihat pada Gambar 2.

Dari hasil optimasi, juga terlihat pada Gambar 1; diketahui bahwa waktu batas *sintering* (t_b) jauh

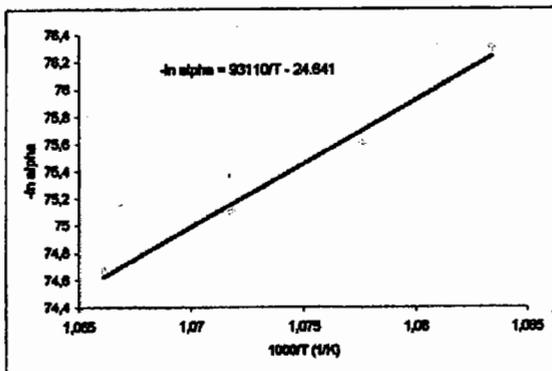
lebih cepat pada suhu yang lebih tinggi. Pada suhu yang lebih tinggi, jumlah atom yang putus dari ikatannya, berdifusi dan berinteraksi satu sama lain akan semakin banyak sehingga probabilitas untuk membentuk struktur / konfigurasi yang khas (konfigurasi kristal tertentu) menjadi semakin besar. Oleh karena itu waktu sinter menjadi semakin singkat karena waktu untuk memulai terbentuk fase kristal menjadi semakin cepat.

Bila hubungan waktu batas sinter (t_b) dengan suhu berlangsung secara eksponensial maka dapat dinyatakan dengan persamaan (6)

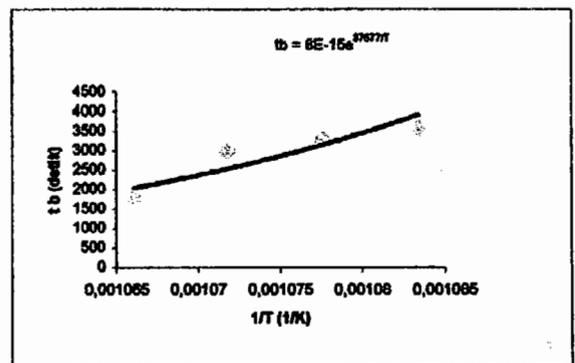
$$t_b = 8.10^{-15} \exp\left[\frac{37577}{T}\right] \quad (6)$$

Persamaan (6) berlaku untuk kisaran suhu percobaan yaitu antara 650°C sampai dengan 665°C. Hubungan tetapan tersebut terhadap suhu dapat dilihat pada Gambar 3.

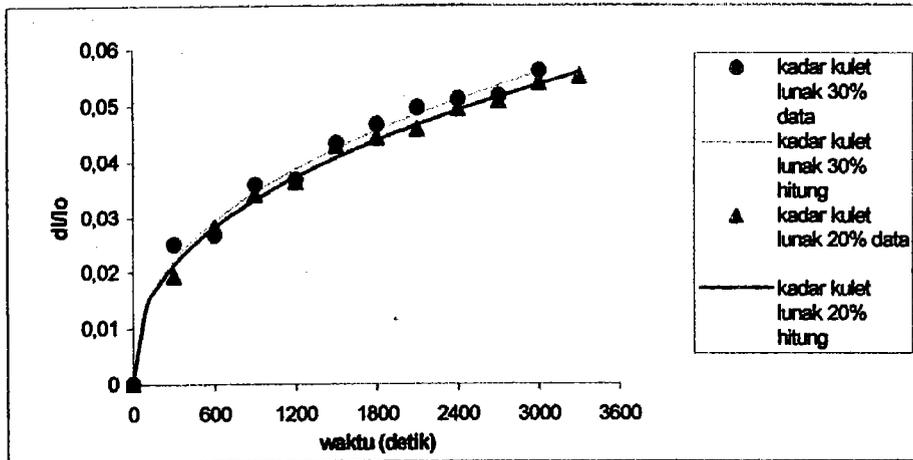
Sebagai data pembanding, dilakukan penelitian terhadap besarnya penyusutan ($\Delta L/L_0$) pada suhu sinter 660°C jika sampel sinter menggunakan gelas LAS yang dibuat berdasarkan komposisi stoikiometris dengan kadar kulet lunak 20% dan 30% berat campuran padat zeolit-kulet lunak. Besarnya $\Delta L/L_0$ data dan hasil optimasi dari kedua jenis gelas LAS ini dapat dilihat pada Gambar 4, sedangkan nilai tetapan hasil optimasi dapat dilihat pada Tabel 2.



Gambar 2. Hubungan antara α dan suhu mutlak (K)



Gambar 3. Hubungan antara waktu batas sinter (t_b) dan suhu mutlak (K)



Gambar 4. Penyusutan ($\Delta L/L_0$) pada suhu sinter 660°C untuk sampel sinter dengan kadar kulet lunak 20% dan 30%

Tabel 2. Nilai tetapan hasil optimasi ($m_{\text{glas}}=4$ gram, $T_{\text{sinter}}=660^\circ\text{C}$, L_t/d sampel = 2,8)

Kadar kulet lunak (%)	α ($\text{J.cm}^3/\text{detik}$). 10^{33}	t_b (detik)
20	2,16	3300
30	2,39	3000

Dari Tabel 2. terlihat bahwa nilai α meningkat dengan meningkatnya kadar kulet lunak. Hal ini mengindikasikan bahwa dengan meningkatnya kadar kulet lunak maka energi aktivasi gabungan akan berkurang, ini disebabkan menurunnya kadar SiO_2 dan Al_2O_3 dalam campuran padat tersebut sehingga suhu lebur campuran padat menjadi semakin rendah. Pada suhu 660°C , sampel sinter yang berasal dari gelas LAS dengan kadar kulet lunak 30% mulai mengalami pelunakan (*softening*) sehingga lebih memudahkan terjadinya difusi atom antar butir gelas LAS dibandingkan dengan sampel yang berasal dari gelas LAS dengan kadar kulet lunak 20%. Jika atom-atom lebih mudah berdifusi maka semakin mudah terbentuk leher (*neck*). Pembentukan leher (*neck*) ini menyebabkan terjadinya penyusutan.

Selain membandingkan penyusutan antara sampel sinter yang berasal dari gelas LAS dengan kadar kulet lunak 20% dan 30% berat, juga dilakukan perbandingan fraksi kristal yang terbentuk melalui tahap vitrifikasi-sintering-kristalisasi (metode 1) dan tahap vitrifikasi-kristalisasi (metode 2). Fraksi kristal yang terbentuk dihitung dengan cara membandingkan antara

intensitas puncak utama kristal pada berbagai waktu pemanasan dengan intensitas puncak utama kristal standar yaitu sebesar 1332. Hasil perbandingan antara metode 1 dan metode 2, dapat dilihat pada Tabel 3. berikut.

Tabel 3. Perbandingan fraksi kristal yang terbentuk antara metode 1 dan metode 2 ($T=675^\circ\text{C}$, kecepatan pemanasan = $3^\circ\text{C}/\text{menit}$)

t (menit)	Fraksi kristal (x_c)	
	Metode 1	Metode 2
0	0,0368	0
30	0,0811	0,005
60	0,0976	0,013
120	0,1119	0,051

Keterangan :

Metode 1 : tahap vitrifikasi-sintering-kristalisasi

Metode 2 : tahap vitrifikasi-kristalisasi (Perdana, 2001)

Dari Tabel 3. terlihat bahwa fraksi kristal yang terbentuk melalui metode 1 lebih besar daripada yang terbentuk melalui metode 2. Hal ini disebabkan adanya tahap pembubukan pada metode 1 sehingga jarak antar atom di perbatasan butiran gelas pada awal sinter menjadi semakin dekat jika dibandingkan dengan jarak antar atom yang terbentuk pada metode 2 yang tidak melalui tahap pembubukan (langsung dikenai pemanasan kembali setelah terbentuk fase gelas). Jarak antar atom yang semakin dekat ini menyebabkan atom-atom mudah untuk berdifusi membentuk daerah leher (*neck*), meninggalkan *vacancy* pada posisi yang ditinggalkan. Beberapa *vacancy* yang terjadi

ini kemudian diisi kembali oleh atom-atom lain, yang sebagian atom tersebut mendifusi ke arah leher (*neck*) dan sebagian lagi mengatur posisi membentuk struktur yang khas. Adanya pengaturan posisi yang lebih mudah ini, menyebabkan lebih mudahnya terbentuk struktur kristal.

5. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Gelas keramik LAS dapat dibuat dari zeolit alam yang telah jenuh menyerap limbah simulasi yang mengandung Pb radioaktif dengan menambahkan oksid Li_2O dan TiO_2 serta kulet lunak. Pada proses kristalisasi pasca *sintering* terbentuk gelas keramik LAS dengan jenis kristal β -quartz.
2. Proses *sintering* dilakukan pada kisaran suhu antara 650°C sampai dengan 665°C dengan kecepatan pemanasan $3^\circ\text{C}/\text{menit}$. Penyusutan linear arah aksial maksimal sebesar 5,6% terjadi pada suhu 660°C .
3. Proses *sintering* dapat didekati dengan model yang diajukan oleh Kingery dan Berg (1959), dengan hasil
 - a) Energi aktivasi gabungan = 773,278 kJ/mol
 - b) Waktu batas sinter (t_b) = $8.10^{-15} \exp(37577/T)$ detik
4. Gelas LAS dengan kadar kulet lunak 30% memiliki energi aktivasi gabungan yang lebih rendah daripada gelas LAS dengan kadar kulet lunak 20%.
5. Proses *sintering* pada suhu 675°C menghasilkan fraksi kristal *Aquartz* yang lebih banyak daripada fraksi kristal β -quartz yang terbentuk melalui proses kristalisasi langsung. Untuk waktu kristalisasi 30 menit, diperoleh rasio kristal β -quartz hasil proses *sintering* terhadap kristal β -quartz hasil proses kristalisasi langsung sebesar 16,2.

Daftar dan Arti Lambang

- a^3 : volume vacancy, cm^3
 d : diameter sampel, cm
 D^* : self diffusion coefficient, cm^2/detik

- E_1 : energi Aktivasi Difusi, kJ/mol
 E_2 : energi Aktivasi ikatan, kJ/mol
 E_3 : energi aktivasi gabungan, kJ/mol
 k_b : konstanta Boltzmann, J/mol.K
 L_o : panjang sampel saat awal sinter, cm
 L_t : panjang sampel mula-mula, cm
 ΔL : perubahan panjang, cm
 r : jari jari butiran gelas cm
 T : suhu sinter, K
 t : waktu sinter, detik
 t_b : waktu batas sinter, detik
 x_c : fraksi kristal yang terbentuk
 α : tetapan gabungan difusi- Surface Energy, $\text{J.cm}^3/\text{detik}$
 γ : surface energy, J/cm^2
 γ' : tetapan gabungan Surface Energy, J.cm

Ucapan Terima Kasih

Pada kesempatan ini peneliti mengucapkan terima kasih kepada Pimpinan Program Studi Pascasarjana UGM, Pimpinan Laboratorium Teknologi Keramik, Pimpinan Proyek URGE batch IV, serta semua pihak yang telah membantu kelancaran penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Boccacini, A.R., Stumpfe, W., Taplin, D.M.R., and Ponton, C.B., 1996, "Densification and Crystallization of Glass Powder Compacts During Constant Heating Rate Sintering", *Material Science and Engineering A*, 219,26-31.
- Kingery, W.D., 1959, *Kinetics of High-Temperature Processes*, pp. 149-151, The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology, John Wiley and Sons, Inc., New York
- Perdana, I., 2001, Pembentukan Gelas Keramik Litium Alumino Silikat dari Zeolit Alam, *Thesis S2*, Program Pascasarjana, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
- Rabinovich, E.M., 1982, *Cordierite Glass-ceramics produced by Sintering in Advances in Ceramics*, Vol.4, Nucleation and

Crystallization in Glasses, pp. 327-333, American Ceramic Society, Columbus.

Sabioni, A.C.S., Zanotto, E.D., Millot, F., Tuller, H.L., 1988, *Oxygen selfdiffusion in a Cordierite Glass*, *J. Non-Cryst. Solids.*, 242, 177-182.

Strnad, Z., 1986, *Glass Science and Technology : Glass Ceramic Material*, Vol 8, pp.13, 129-

130, Elsevier Science Publishing Company, Inc., Amsterdam.

Yekta, B.E and Marghussian, V.K., 1999, *Sintering of β -q.s.s and Gahnite Glass Ceramics*, *J. Eur. Ceram Soc.*, 19, 2963-2968.