

SINTESIS GELAS KERAMIK LITHIUM ALUMINA SILIKAT UNTUK IMOBILISASI SIMULASI LIMBAH STRONSIUM-90

R. Didiek Herhady^{*)}, Kusnanto^{)}, R. Sukarsono^{*)}, Busron Masduki^{*)}**

^{*)} Pusat Penelitian dan Pengembangan Teknologi Maju – BATAN

^{)} Teknik Fisika - UGM**

ABSTRAK

SINTESIS GELAS KERAMIK LITHIUM ALUMINA SILIKAT UNTUK IMOBILISASI SIMULASI LIMBAH STRONSIUM-90. Telah dilakukan penelitian untuk mengelola limbah radioaktif stronsium-90 dengan memanfaatkan zeolit alam teraktivasi yang diubah menjadi gelas-keramik lithium alumina silikat (LAS) melalui teknik vitrifikasi. Pencetakan gelas keramik dilakukan dengan berbagai variasi penekanan untuk mendapatkan nilai terbaik agar diperoleh gelas keramik yang kuat secara mekanik dan kimiawi sehingga unsur stronsium yang terserap tidak menyebar kembali ke lingkungan. Penjerapan limbah stronsium 8 ppm oleh zeolit 200 mesh sampai setimbang dilakukan dengan interval pengambilan efluen pada (20, 40, 60, 80, 120, 180, 300 dan 700) menit. Konsentrat zeolit-Sr hasil penjerapan dicampur secara homogen dengan bahan pembentuk gelas untuk dipanasi pada temperatur 1200 °C dengan laju pemanasan 5 °C per menit dan ditahan selama 4 jam. Gelas yang terbentuk digerus sampai 200 mesh kemudian dicetak menjadi tiga buah silinder limbah pada variasi penekanan 1,58 ton; 3,17 ton; 4,75 ton dan 6,33 ton. Selanjutnya gelas-keramik disinter pada temperatur 660 °C dengan laju pemanasan 3 °C per menit ditahan selama 75 menit. Hasil uji kekuatan mekanik terbaik dengan nilai kuat tekan sebesar 48,117 Mpa dan kerapatan setelah sintering sebesar 1,861 g.cm⁻³ diperoleh pada penekanan silinder limbah pada kekuatan 6,33 ton.

Kata kunci: gelas keramik, lithium alumina silikat, imobilisasi limbah

ABSTRACT

SINTESYS OF LITHIUM ALUMINA SILICATE GLASS-CERAMIC FOR IMMOBILIZATION OF SIMULATED STRONSIUM-90 WASTE. The utilization of activated natural zeolite to process strontium-90 radioactive waste has been studied. Natural zeolite was modified into lithium alumina silicate (LAS) glass-ceramic through vitrification technique. The formation of glass-ceramic was done with some variation on pressing value to get an optimal value and get the glass-ceramic that strong mechanically and chemically, so the adsorbed strontium will not spread to the environment. Eight ppm strontium waste was adsorbed by zeolite 200 mesh until

saturated level was reached by effluent. Time intervals for observation were (20, 40, 60, 80, 120, 180, 300 and 700) minutes. The result of adsorption mixed homogenously with glass mineral heated at 1200 °C temperature with heating rate 5 °C per minute and holding time 4 hours. The glass was crushed to 200 mesh and formed to three solid silinders with the pressing variation 1,58 tons; 3.17 tons; 4.75 tons and 6.33 tons and then sintered at 660 °C with heating rate 3 °C per minute and holding time 75 minute.

It was shown that the press strength of 48.117 Mpa and the bulk density of 1.861 g.cm⁻³ after sintering was obtained by pressing at 6.33 tons.

Key words: glass-ceramic, lithium alumina silicate, waste immobilization

PENDAHULUAN

Limbah radioaktif adalah semua zat radioaktif yang tidak digunakan lagi, serta bahan-bahan bekas dan alat-alat yang terkontaminasi zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena operasi nuklir yang juga tidak digunakan lagi. Limbah radioaktif dapat berbentuk gas, cair, dan padat [1].

Limbah radioaktif gas berasal dari udara yang keluar dari reaktor nuklir melalui cerobong-cerobong asap, *filter*, dan penguapan bahan radioaktif. Limbah ini mengandung unsur-unsur radioaktif seperti ⁸⁵Kr, ³H, dan ¹³¹I. Limbah radioaktif cair berasal dari sistem ekstraksi tahap awal dari pengolahan ulang bahan bakar nuklir bekas dan proses iradiasi bahan bakar, sedangkan limbah radioaktif padat berasal dari tambang dan pabrik penghancuran bijih uranium, thorium, lumpur, dan tangki penyimpanan yang mengandung limbah padat dan dari peralatan yang sudah terkontaminasi .

Limbah radioaktif perlu dikelola secara khusus. Tujuan umum dari pengelolaan limbah radioaktif adalah membuat dosis radiasi yang diterima manusia serendah mungkin sehingga dalam setiap keadaan dosis yang diterima tidak melebihi dosis maksimum tahunan yang diperkenankan, maka hanya beberapa limbah saja yang perlu mendapat perhatian khusus, yaitu limbah yang memiliki waktu paro panjang dan

aktivitasnya tinggi dengan cara mengungkung dengan bahan-bahan yang kuat dan tahan lama [2].

Salah satu limbah radioaktif ialah stronsium-90, berasal dari limbah instalasi nuklir sebagai hasil fisi uranium bahan bakar reaktor nuklir, baik reaktor riset, reaktor produksi isotop, maupun reaktor daya. Unsur ^{90}Sr berumur paro 28,1 tahun bila masuk ke dalam tubuh manusia akan berkelakuan seperti kalsium (unsur golongan IIA) mengumpul dalam tulang (*bone seeker*) dan menjadi sumber radiasi internal bagi tubuh dalam waktu lama, yang dapat menimbulkan efek somatis, seperti kanker tulang, tumor, dan leukimia. Oleh karena itu perlu dilakukan penelitian untuk mengolah limbah radioaktif ^{90}Sr dengan baik dan benar.

Stronsium (Sr) adalah logam alkali tanah (golongan IIA) dengan nomor atom 38, berat atom rata-rata stronsium stabil adalah 87,62 sma. Sifat kimia stronsium mirip logam alkali tanah terutama kalsium dan barium. Dalam temperatur kamar stronsium berbentuk padat, berwarna putih perak, mempunyai titik lebur $771\text{ }^{\circ}\text{C}$, titik didih $1366\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan titik uap $1384\text{ }^{\circ}\text{C}$. Unsur stronsium mempunyai beberapa macam isotop : ^{81}Sr , ^{82}Sr , ^{83}Sr , ^{84}Sr , ^{85}Sr , ^{86}Sr , ^{87}Sr , ^{88}Sr , ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{93}Sr , ^{94}Sr , ^{95}Sr , dan ^{97}Sr .

Isotop stronsium (^{90}Sr) merupakan radionuklida dengan waktu paro panjang, yaitu 28 tahun. Sedangkan isotop-isotop yang lain waktu paronya beberapa detik sampai beberapa hari. Stronsium-90 yang memiliki diameter atom $3,82\text{ \AA}$ merupakan radionuklida pemancar beta murni dengan energi sebesar $1,18\text{ watt/kcuri}$ dan bersifat mengendap di dalam tubuh dengan waktu paro biologis di dalam tulang 50 tahun.

Stronsium-90 masuk ke dalam tubuh manusia melalui dua cara, yaitu penelanan (*ingestion*), masuk lewat dalam rantai makanan manusia dan penghirupan (*inhalation*) yaitu partikel-partikel debu radioaktif yang terhirup oleh manusia melalui pernafasan, kemudian mengendap dalam tubuh sebagai sumber radiasi internal. Stronsium-90 pada sistem metabolisme tubuh akan terkumpul dalam sumsum tulang merah (*red bone marrow*) dan akan merusak produksi sel-sel darah merah. Efek radiasi

yang dapat ditimbulkan adalah kanker tulang, tumor, dan leukemia. Efek genetik tidak terlihat karena ^{90}Sr tidak terkumpul dalam organ-organ reproduksi [3].

Radionuklida ^{90}Sr dihasilkan dari operasi bahan bakar reaktor nuklir, pembuangan limbah radioaktif, jatuhnya debu radioaktif, dan percobaan peledakan nuklir. Stronsium 90 adalah produk fisi uranium-233 (^{233}U), uranium-235 (^{235}U), dengan neutron termal. Stronsium-90 terjadi dari proses meluruhnya kripton-90 (^{90}Kr). Hampir 5 % (*yield*) dan hasil fisi menghasilkan ^{90}Kr berwaktu paro pendek kemudian menjadi rubidium-90 (^{90}Rb) dengan memancarkan sinar beta negatif.

Zeolit adalah kristal aluminosilikat terhidrasi dengan kation-kation alkali dan alkali tanah, memiliki struktur-struktur kerangka tiga dimensi dengan rongga-rongga berdiameter (3-10) Å. Bagian dasar pembentuk zeolit adalah silikat SiO_4^{-4} dan aluminat AlO_4^{-5} yang mempunyai bentuk tetrahedral. Tetrahedral-tetrahedral kemudian saling berikatan membentuk sudut yang dihubungkan atom oksigen.

Zeolit mempunyai sifat-sifat umum sebagai berikut :

- a. Permukaan berpori.
- b. Dapat melakukan pertukaran ion alkalinya dengan ion-ion lain.
- c. Bersifat penjerap (adsorbent).
- d. Dapat digunakan sebagai katalis dalam proses pengolahan minyak bumi.
- e. Merupakan kristal yang lunak.
- f. Variasi berat jenis rata-rata adalah 2 sampai 2,4.
- g. Molekul air yang dikandungnya dapat dilepaskan dengan pemanasan.

Rumus umum zeolit adalah $M_{x/n} \{(\text{Al}_2\text{O}_3)_x(\text{SiO}_2)_y\}z\text{H}_2\text{O}$, gugus $M_{x/n}$ merupakan kation penetral dengan valensi n dan dapat dipertukarkan, $\{(\text{Al}_2\text{O}_3)_x(\text{SiO}_2)_y\}$ sebagai gugus kerangka aluminosilika, dan $z\text{H}_2\text{O}$ sebagai gugus air.

Komponen non rangka zeolit lainnya adalah air yang mengisi rongga-rongga dan celah-celah rangka serta dapat dihilangkan dengan pemanasan sampai temperatur 450°C . Pemanasan atau dehidrasi ini tidak mengubah struktur rangka dan posisi kation.

Apabila air terurai pada proses pemanasan, rongga-rongga kristal zeolit akan mengembang membentuk celah-celah yang siap mengabsorpsi gas atau cairan.

Zeolit memisahkan molekul berdasarkan ukuran molekul relatif terhadap ukuran struktur zeolit. Sebagai penyerap, permukaan zeolit menunjukkan daya tarik terhadap air dan molekul polar lainnya. Hal ini disebabkan oleh adanya senyawa polar seperti kation atau anion dalam rongga kristalnya dan medan elektrik atom Al di pusat rangka tetrahedral.

Zeolit mempunyai sifat khas, apabila mengalami dehidrasi kristal, zeolit akan membentuk rongga-rongga yang saling berhubungan dan membentuk satu sampai tiga arah seperti sangkar. Fungsi dehidrasi adalah untuk mempertinggi aktifitas zeolit sebagai bahan penjerap. Kemampuan zeolit dalam mengikat dapat dilihat dari bentuk struktur saringan pada zeolit, dengan bentuk ini zeolit dapat memisahkan molekul-molekul berdasarkan ukuran dan konfigurasi.

Zeolit yang mengandung klinoptilolit $(\text{Na}_4\text{K}_4)(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$ dan modernit $\text{Na}_8(\text{Al}_8\text{Si}_{40}\text{O}_{96}) \cdot 24\text{H}_2\text{O}$, menunjukkan bahwa zeolit kaya kation natrium dan kalium sehingga mempengaruhi sifat pertukaran ion. Hal ini disebabkan ion tersebut mudah bertukar dengan kation lain. Sifat penjerapan pada permukaan zeolit muncul karena pada permukaan tiap unit kristal zeolit memiliki listrik statis negatif (*non electrically neutral surface*) [3]. Oleh karena itu kation-kation yang bermuatan listrik positif di sekitar zeolit akan ditarik ke permukaan negatif zeolit.

Atom aluminium (Al) dalam gugus tetrahedral bermuatan negatif satu karena dalam kerangka zeolit atom Al bervalensi tiga harus mengikat empat atom oksigen (O) yang lebih elektronegatif. Setiap Al dalam kerangka zeolit selalu diikuti oleh satu kation Na^+ sebagai penetral. Keadaan seperti ini yang menyebabkan zeolit dapat bersifat sebagai penukar ion (*ion exchange*).

Kemudian stronsium-90 dalam larutan limbah akan menuju permukaan luar zeolit dan diikat oleh sisi aktif zeolit pada permukaan zeolit, sedangkan sebagian lain

akan menuju pori-pori zeolit. Pada akhirnya diikat oleh sisi aktif rongga dalam pori-pori tersebut. Reaksi pengikatan ini terjadi karena gaya elektromagnetik antara ^{90}Sr yang positif dengan sisi aktif zeolit yang bermuatan negatif.

Salah satu jenis gelas-keramik yang dapat dibuat adalah gelas-keramik lithium alumina silikat dari mineral zeolit. Zeolit yang kaya dengan berbagai oksida gelas seperti Al_2O_3 ($\pm 10\%$) dan SiO_2 ($\pm 70\%$) dengan ditambahi senyawa lithium sulfat monohidroksida ($\text{LiSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), maka komposisi zeolit akan mendekati bahan gelas-keramik LAS dan berpotensi sebagai bahan baku pembuatan gelas-keramik LAS tersebut. Kelebihan gelas-keramik LAS adalah koefisien ekspansi panas yang rendah sehingga tahan secara mekanik dan kimiawi. Kristal yang mendominasi dalam gelas-keramik LAS adalah β -*spodumene* ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$) dan β -*eucryptite* ($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [3].

Pembuatan gelas dibentuk melalui proses vitrifikasi yang meliputi pencampuran limbah dengan bahan gelas, pemanasan, dan pendingin produk. Proses ini dilakukan pada temperatur antara 800°C sampai dengan 1200°C .

Selanjutnya untuk mengetahui kualitas sifat mekanik dari gelas-keramik perlu dilakukan uji tekan dengan mensimulasi pola pembebanan yang akan dialami oleh material pada kondisi operasi. Agar hasil pengujian dapat dibandingkan maka dimensi dari benda uji dan metode pemberian beban dilakukan standarisasi. Pengujian tekan dilakukan dengan memberi beban tekan pada bahan uji berbentuk silinder secara kontinu. Ketika bahan uji diberi pembebanan perubahan gaya (F) diukur dan dicatat. Perubahan panjang diukur seiring dengan pembebanan. Tegangan aksial (σ) bahan uji dihitung dengan membagi beban terhadap luas penampang (A) :

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Simbol σ sebagai tegangan aksial dalam kg/cm^2 , F sebagai kekuatan pembebanan dalam kg dan A sebagai luas muka bahan uji dalam cm^2 . Pencetakan silinder limbah dengan penekanan yang semakin besar akan menghasilkan silinder limbah dengan densitas yang tinggi sehingga kuat tekan silinder limbah semakin baik.

Prinsip pengolahan limbah radioaktif adalah sebagai berikut :

- a. Pengenceran atau dispersi, prinsip ini diterapkan pada limbah yang aktivitasnya rendah dengan pengenceran 10 kali sebelum dibuang ke lingkungan terisolasi.
- b. Penundaan dan peluruhan, digunakan untuk limbah berumur paro pendek.
- c. Pemadatan, solidifikasi, atau imobilisasi, digunakan untuk limbah dengan volume besar.

Imobilisasi adalah mengubah limbah gerak menjadi limbah diam untuk mengurangi kemampuan pindah (migrasi) atau menyebar (dispersi) radionuklida yang ada dalam limbah karena proses penyimpanan, pengangkutan, dan pembuangan. Tujuan imobilisasi adalah agar kontaminan radionuklida yang ada dalam konsentrat endapan tidak dapat terekstrak kembali ke air sehingga dapat menyebar ke lingkungan manusia dan hewan [1].

Proses pemadatan limbah radioaktif cair diendapkan oleh resin penukar ion, pengendap kimia, atau diuapkan (evaporasi). Kerak yang tertinggal dikumpulkan dan dimampatkan. Limbah radioaktif gas, yang berada di almari asam, *glove box*, atau *hot cell* ditangkap dengan filter penjerap (*adsorbent*).

Zeolit yang kaya akan berbagai oksida gelas seperti alumina-silikat, bila ditambah bahan pembentuk gelas seperti lithium dan dipanaskan pada temperatur tinggi dapat berubah fase menjadi gelas-keramik lithium alumina silikat. Diharapkan dalam fase gelas-keramik ini ^{90}Sr dengan bahan-bahan gelas sehingga didapatkan silinder limbah gelas-keramik yang kuat secara mekanik maupun kimiawi [4].

TATA KERJA

Bahan

Lithium sulfat monohidrat $\text{Li}_2\text{SO}_4\text{H}_2\text{O}$, $M = 127,95$ g/mol kemurnian minimum 99%, Ca maksimum 0,005%, Fe 0,0005%, K 0,05%, Na 0,005%; aluminium trioksida Al_2O_3 , $M = 101,94$ g/mol kemurnian 99%, As maksimum 0,0005%, Fe 0,002%; titanium oksida TiO_2 , $M = 79,90$ g/mol kemurnian 99%, As maksimum 0,0005%, Fe 0,005%; kulet lunak dari pecahan tabung kaca lampu TL merk Philips; kristal stronsium nitrat $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ diproduksi oleh Merck dengan kadar 99% dan berat molekul 211,63; Bata tahan api; larutan natrium silikat Na_2SiO_3 , $M = 379,35$ g/mol, kemurnian 99%; akuades; zeolit dari Sukabumi.

Alat

Timbangan merk Sartorius BP 310 S kapasitas 310 gram; alat cetak silinder limbah dari besi, diameter 2 cm dan tinggi 4 cm; alat tekan cetak, dengan skala (1-8) ton; tungku pemanas *Carbolite* 1600 °C; alat pengayak 200 mesh; alat uji tekan SFM-30 buatan *United Calibration Corp.*

Cara kerja

1. Pembuatan limbah simulasi stronsium

Limbah simulasi dibuat dengan cara melarutkan kristal $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ sebanyak 0,241 gram pada satu liter akuades untuk mendapatkan konsentrasi 100 ppm. Kemudian dilakukan pengenceran sampai didapat konsentrasi 8 ppm.

2. Penjerapan limbah oleh zeolit

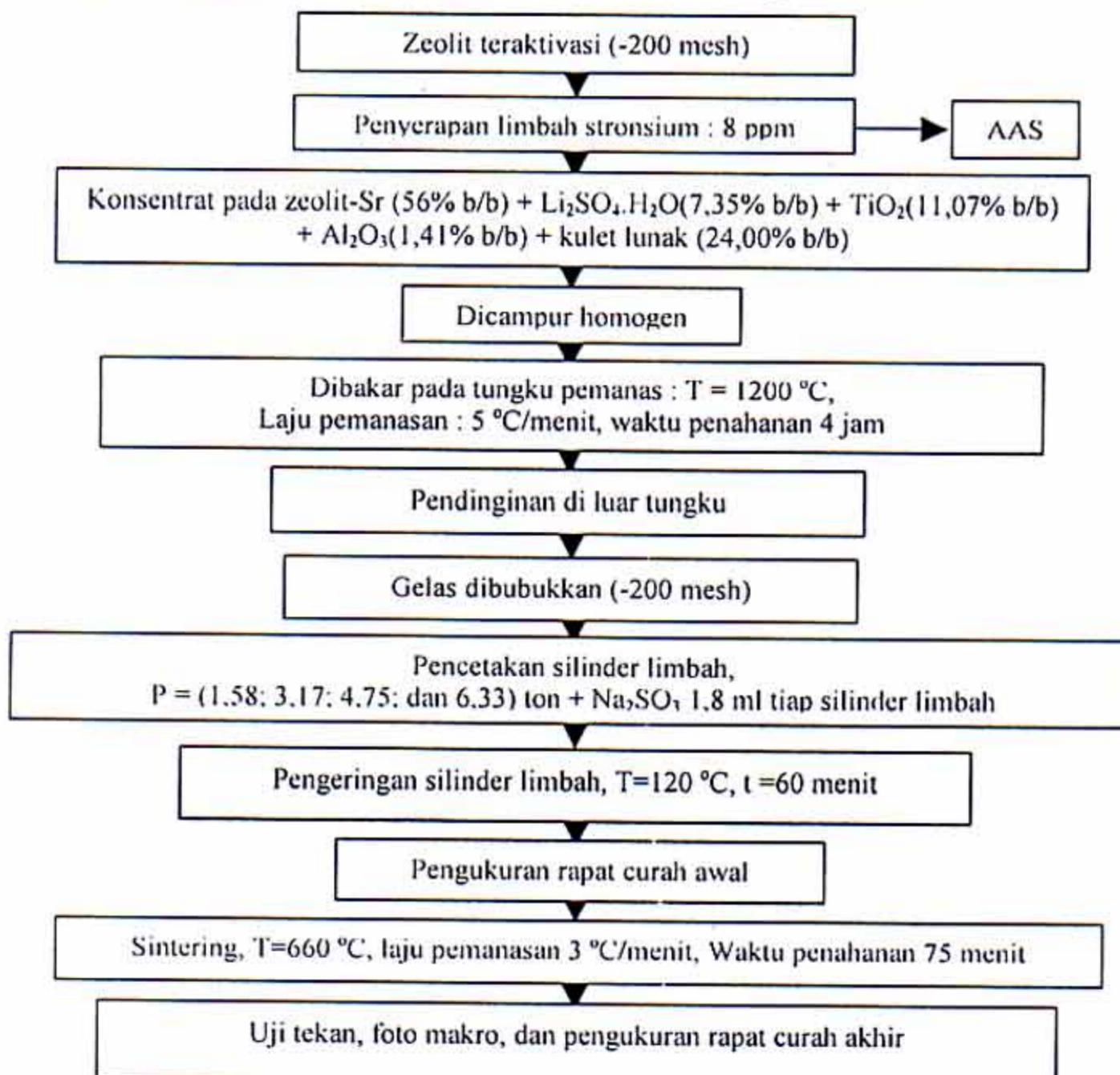
Penjerapan dilakukan dengan metode *rotared batch*, yaitu zeolit dan limbah diletakkan pada wadah yang berputar secara konstan. Kemudian diambil filtratnya tiap (20, 40, 60, 80, 120, 180, 300, dan 700) menit, kemudian dianalisis dengan AAS.

3. Pencampuran zeolit dengan bahan gelas

Komposisi perbandingan antara zeolit sebagai penjerap limbah Sr dan bahan-bahan gelas sbb. (3) :

- Zeolit-Sr = 56,00% berat = 28,00 gram
- $\text{Li}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ = 11,07% berat = 5,53 gram
- TiO_2 = 1,41% berat = 0,71 gram
- Al_2O_3 = 7,35% berat = 3,67 gram
- Kulet lunak = 24,00% berat = 12,00 gram

Pencampuran dilakukan dengan diaduk sampai homogen selama 10 menit. Secara garis besar langkah-langkah penelitian adalah sebagai berikut :



Gambar 1. Diagram alir proses sintesis gelas-keramik LAS

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penyerapan limbah stronsium

Penyerapan limbah stronsium-90 sebanyak 8 ppm oleh zeolit sampai setimbang dengan cara *rotared batch*. Perbandingan berat zeolit dan volume limbah stronsium adalah 1 gram zeolit untuk 20 mL limbah. Efluen hasil penyerapan dianalisis kandungan stronsiumnya dengan *atomic absorption spectrophotometer* (AAS). Hasil dari AAS didapat sebagai berikut :

Tabel 1. Penjerapan Limbah Stronsium

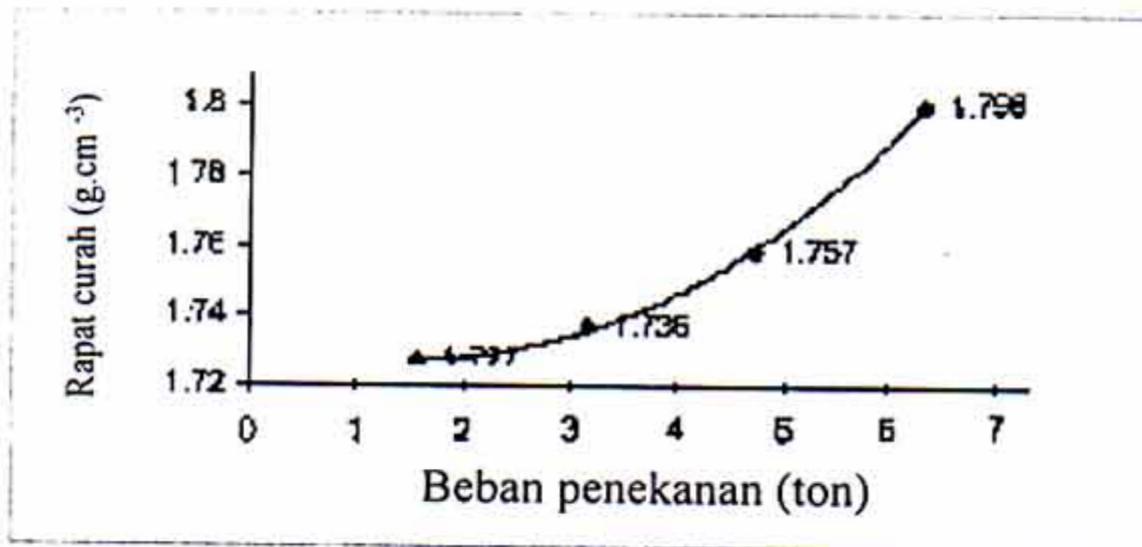
No.	Waktu Penyerapan (menit)	Kadar Awal (ppm)	Kadar Akhir (ppm)	Efisiensi Penyerapan (%)
1	Ø20	8	0,00	100
2	Ø40	8	0,00	100
3	Ø60	8	0,00	100
4	Ø80	8	0,00	100
5	120	8	0,00	100
6	180	8	0,00	100
7	300	8	0,00	100
8	700	8	0,00	100

Pada Tabel 1 menunjukkan waktu penyerapan filtrat limbah stronsium pada 20 menit pertama telah mencapai maksimum dengan efisiensi penyerapan 100%. Ini berarti zeolit dengan ukuran lolos 200 mesh telah mencapai setimbang dalam menyerap limbah stronsium pada 20 menit pertama, sedangkan perpanjangan waktu sampai 700 menit sebagai perkiraan awal zeolit mencapai waktu setimbang.

Pencetakan silinder limbah dan rapat curah

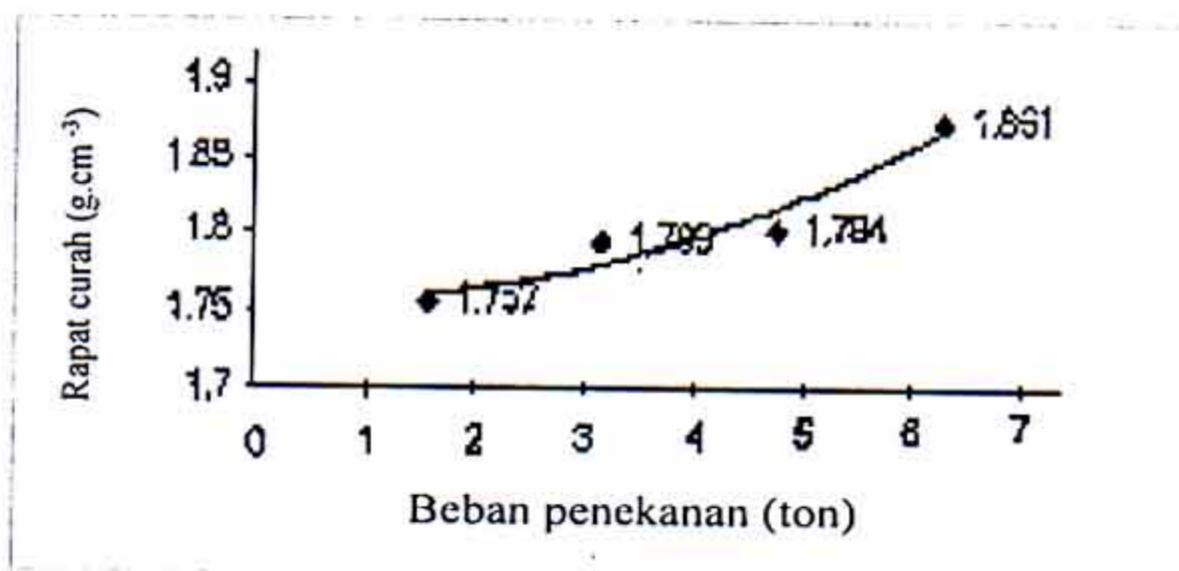
Zeolit yang telah digunakan untuk menyerap limbah stronsium ditambahi bahan-bahan pembentuk gelas dan dipanaskan pada temperatur 1200 °C, kemudian dibubukkan sampai lolos 200 mesh. Setelah menjadi bubuk dicetak menjadi silinder

limbah dengan beban penekanan 1,58 ton; 3,17 ton; 4,75 ton; dan 6,33 ton, kemudian ditimbang beratnya untuk mengukur rapat curah, kemudian dibuat grafik seperti Gambar 2.



Gambar 2. Grafik hubungan beban penekanan dengan rapat curah sebelum sintering

Gambar 2 memperlihatkan hubungan antara variasi beban penekanan dengan rapat curah sebelum disinter, bahwa semakin besar beban yang diberikan saat pencetakan silinder limbah harga rapat curah-nya semakin besar. Dari penelitian ini nilai rapat curah terbaik didapatkan pada silinder limbah dengan beban penekanan 6,33 ton, yaitu 1,798 ton.

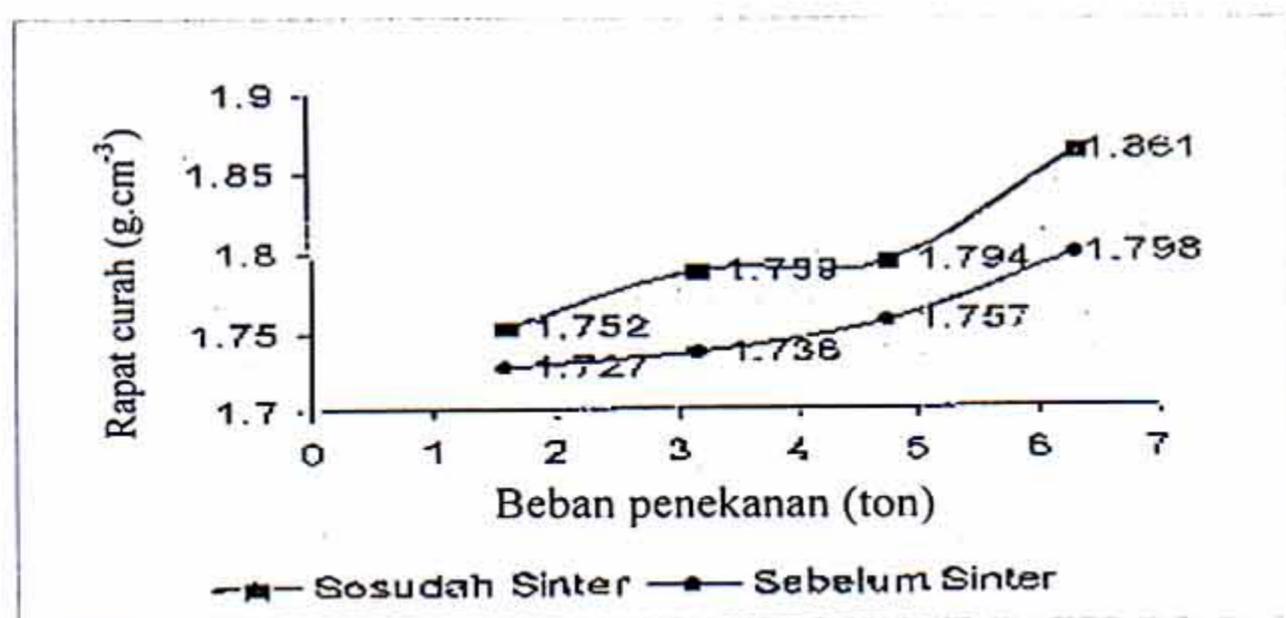


Gambar 3. Grafik hubungan beban penekanan dengan rapat curah setelah sintering

Gambar 3 menunjukkan bahwa hubungan antara variasi beban penekanan dengan rapat curah setelah sintering masih sama dengan pola hubungan sebelum sintering, yaitu semakin besar beban penekanan, maka semakin besar pula rapat curah yang dihasilkan. Pada penelitian ini nilai rapat curah terbaik yang didapatkan setelah disinter adalah 1,861 pada penekanan 6,33 ton.

Gambar 2 dan 3 memperlihatkan kecenderungan meningkatnya rapat curah bersamaan dengan bertambahnya beban penekanan saat pencetakan. Hal ini disebabkan semakin besar beban yang diberikan saat pencetakan, maka akan terjadi pemampatan dan perapatan butir-butir gelas dengan mengisi ruang-ruang kosong antara butir-butir yang ada sampai tidak ada lagi pengisian yang berarti atau mencapai maksimal.

Penekanan yang maksimal membuat bubuk akan mengatur sedemikian rupa untuk menahan tekanan tersebut sehingga porositas diantara butir bubuk menjadi kecil. Dengan demikian volume *solid* dan volume rongga antara butir menjadi kecil untuk massa yang sama rapat curah menjadi besar.



Gambar 4. Grafik hubungan rapat curah sebelum dan sesudah sintering

Gambar 4. Menunjukkan bahwa rapat curah sesudah sintering mengalami kenaikan bila dibandingkan sebelum sintering. Gejala kenaikan ini karena panas yang ada membuat partikel-partikel *solid* melunak sehingga memungkinkan terjadi reaksi

padat-padat dan terbentuk struktur yang lebih kompak karena ada semacam ikatan padat yang terbentuk di antara butir-butir bubuknya.



Gambar 5. Grafik hubungan beban penekanan dengan kuat tekan

Berdasarkan Gambar 5 terlihat bahwa nilai kuat tekan semakin meningkat dengan semakin besar beban penekanan yang diberikan pada silinder limbah. Hal ini karena semakin kuat penekanan, maka silinder limbah akan semakin kompak. Dari sampel uji penelitian ini, nilai kuat tekan terbaik didapatkan sebesar 48,177 Mpa pada penekanan 6,33 ton.

KESIMPULAN

Rapat curah silinder limbah gelas keramik meningkat dengan kenaikan beban penekanan saat pencetakan. Proses penyinteran dapat menaikkan rapat curah dari 1,45% sampai dengan 3,50%. Hasil uji tekan silinder limbah gelas keramik memperlihatkan bahwa semakin besar beban penekanan, maka semakin besar pula kuat tekannya. Nilai kuat tekan terbaik pada penelitian ini sebesar 48,117 Mpa dan kerapatan setelah disinter sebesar $1,861 \text{ g.cm}^{-3}$ didapat pada penekanan 6,33 ton.