

PENENTUAN KEKENTALAN GELAS-LIMBAH UNTUK KARAKTERISASI PROSES VITRIFIKASI.

WATI, HERLAN MARTONO

*Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN
Kawasan Puspitek Serpong, Tangerang 15310, Banten
Telp. 021.7563142, Faks. 7560927*

Abstrak

PENENTUAN KEKENTALAN GELAS-LIMBAH UNTUK KARAKTERISASI PROSES VITRIFIKASI.

Kekentalan gelas-limbah pada berbagai suhu telah ditentukan dengan viskometer bola jatuh. Untuk operasional melter dalam skala industri perlu ditentukan titik lebur/leleh sesuai dengan suhu pada saat kekentalan gelas-limbah 100 poise. Tingkat kekentalan gelas-limbah ini juga diperlukan untuk pengeluaran lelehan gelas-limbah dari melter ke canister. Penentuan kekentalan gelas-limbah pada suhu tinggi dilakukan dengan viskometer bola jatuh dari platina. Kekentalan gelas-limbah pada suhu rendah dapat ditentukan dengan Persamaan Vogel-Fulcher-Tammann. Berdasarkan persamaan tersebut diperoleh titik lebur gelas-limbah 1074 °C, pengeluaran gelas-limbah dari melter ke canister pada suhu 1000 °C sesuai kekentalan 235 poise, dan suhu annealing 494 °C. Dengan penurunan suhu 76 °C pada operasi melter skala industri dibandingkan dengan prakiraan suhu peleburan pada pembuatan gelas-limbah di laboratorium yaitu 1150 °C, diperoleh penghematan energi dan mengurangi timbulnya limbah padat sekunder yang berasal dari korosi bata tahan api melter. Dalam proses vitrifikasi skala industri untuk imobilisasi limbah cair aktivitas tinggi, proses annealing tidak dilakukan karena suhu gelas-limbah dalam canister dapat melebihi suhu annealing-nya.

Kata kunci : kekentalan, gelas-limbah, vitrifikasi

Abstract

THE VISCOSITY DETERMINATION OF WASTE-GLASS FOR CHARACTERIZATION OF VITRIFICATION PROCESS.

Viscosity of waste-glass has been determined at various temperature by fall ball viscometer. For melter operation in the industrial scale, it is need to determine melting point according to temperature at the waste-glass viscosity is 100 poise. The waste-glass viscosity also need for drain of melted waste-glass from melter into canister. Determination of waste-glass viscosity at the high temperature is conducted by fall ball of platina viscometer. At the low temperature viscosity of waste-glass can be determined by Vogel-Fulcher-Tammann equation. Based on these equation are get for calculation of waste-glass melting point is 1074 °C, waste-glass drain from melter into canister at temperature 1000 °C according to viscosity 235 poise, and annealing temperature is 494 °C. At decreasing of temperature is 76 °C for operation melter at the industrial scale compared with predicted melting temperature for waste-glass production in laboratory, then will get saving energy and avoid arising secondary solid waste come from refractory corrosion of the melter. Vitrification process in the industrial scale for immobilization high level liquid waste, annealing process is not conducted because the temperature waste-glas in the canister is higher than annealing temperature.

Keywords : viscosity, waste-glass, vitrification

PENDAHULUAN

Bahan bakar nuklir bekas mengandung radionuklida hasil belah, sisa uranium, Pu yang terjadi, dan aktinida. Campuran uranium oksida dan plutonium oksida dapat digunakan sebagai

bahan bakar reaktor pembiak (*fast breeder reactor*), oleh karena itu sisa uranium dan plutonium yang terjadi diambil atau dipisahkan dari bahan bakar bekas. Untuk mengambil sisa uranium dan plutonium yang terjadi digunakan proses olah ulang bahan bakar bekas (*spent*

nuclear fuel reprocessing). Pada proses olah ulang bahan bakar nuklir bekas, yaitu tahap ekstraksi siklus I ditimbulkan limbah cair aktivitas tinggi (LCAT). Aktivitas dan panas yang ditimbulkan LCAT sangat tinggi, sehingga untuk imobilisasi LCAT perlu bahan matriks yang tahan terhadap radiasi dan panas tinggi, serta tahan dalam jangka lama. Aktivitas gelas-limbah dalam satu canister yang volumenya 118 liter mencapai 4×10^5 Ci dan melepaskan panas sekitar 1,4 kW^[1].

Pada saat ini, pengolahan atau solidifikasi LCAT dalam skala industri dilakukan dengan gelas borosilikat yang dikenal dengan proses vitrifikasi. Karakteristik gelas-limbah hasil vitrifikasi meliputi densitas, *thermal expansion* (muai panjang), *transition point* (Tg), *contraction point* (Tc), titik pelunakan, tahanan listrik, kekentalan, laju pelindihan, devitrifikasi, dan volatilitas. Karakteristik gelas-limbah tersebut digunakan untuk disain dan operasi melter, disain canister, transportasi, penyimpanan sementara dan disposal. Kekentalan gelas-limbah ditentukan setelah semua karakteristik tersebut memenuhi syarat untuk operasional. Pada operasi proses vitrifikasi, salah satu karakteristik gelas-limbah yang penting adalah kekentalan. Titik leleh gelas-limbah, penuangan lelehan gelas-limbah dari melter ke canister, dan titik *annealing* ditentukan oleh kekentalan gelas-limbah. Kekentalan gelas-limbah dipengaruhi oleh komposisi dan suhu. Adanya golongan platina (Ru, Rh, Pd) yang tidak larut dalam gelas borosilikat tidak mempengaruhi kekentalan gelas-limbah. Unsur-unsur yang berpengaruh terhadap kekentalan gelas-limbah, juga berpengaruh terhadap laju pelindihannya. Pada suhu tertentu, jika kekentalan gelas-limbah rendah, maka laju pelindihannya tinggi^[2].

Unsur-unsur yang berpengaruh terhadap karakteristik gelas-limbah adalah^[1,3]:

1. Unsur Mo, Zr, dan Cr dapat membentuk fase pemisah, dan mempengaruhi kekentalan gelas-limbah.
2. Unsur Fe, Si, dan Al akan menaikkan suhu pembentukan atau peleburan gelas-limbah.
3. Umumnya gelas borosilikat dengan kandungan SiO₂ lebih besar 40 % mempunyai sifat yang baik^[4].
4. Unsur boron menurunkan suhu pembentukan dan kekentalan gelas-limbah.

5. Unsur Na menurunkan suhu pembentukan dan kekentalan gelas-limbah, tetapi menaikkan laju pelindihan.
6. Unsur Pu lebih sukar disatukan dengan gelas daripada U. Pemisahan fase akan terjadi jika konsentrasi PuO₂ lebih dari 4 % di dalam gelas^[4].
7. Unsur-unsur golongan platina (Ru, Rh, Pd) tidak larut di dalam gelas-limbah, dan akan mengganggu aliran listrik yang timbul pada melter dengan pemanas *joule*.

Pada suhu tinggi, kekentalan gelas-limbah diukur dengan viskometer, berdasarkan atas gravitasi jatuh bebas bola platina dalam lelehan gelas-limbah sesuai dengan hukum Stokes.^[5] Suhu leleh gelas-limbah adalah suhu pada saat kekentalan gelas-limbah 100 poise. Kekentalan lelehan gelas-limbah pada suhu tinggi dapat diukur, tetapi pada suhu rendah tidak dapat diukur. Kekentalan gelas-limbah pada suhu rendah ditentukan dengan perhitungan menggunakan Persamaan Vogel-Fulcher-Tammann^[5].

Pada industri gelas komersial dan laboratorium penelitian gelas di Indonesia penentuan titik lebur belum digunakan viskometer. Peleburan gelas berdasarkan pada perkiraan kadar Si-nya, seperti gelas *pyrex* 80% Si titik leburnya 1300 °C di atas titik lebur yang sebenarnya (suhu pada kekentalan 100 poise)^[5]. Jika penentuan titik lebur di bawah titik lebur sesungguhnya, maka bahan masih berupa campuran oksida. Tujuan penelitian ini adalah untuk menentukan kekentalan gelas-limbah hasil vitrifikasi pada berbagai suhu. Data hasil penelitian ini selanjutnya dapat digunakan untuk menentukan kualitas gelas-limbah hasil vitrifikasi dan juga untuk menentukan titik lebur gelas-limbah dan penuangan lelehan gelas-limbah dari melter ke canister apabila akan diaplikasikan dalam operasi rutin pada skala industri.

METODE

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini LCAT simulasi dari bahan bakar bekas PWR, fraksi bakar 45.000 MWD/MTU, pen adalah pengkayaan uranium 4,5 %, tenaga spesifik 38 MW/MTU dan pendinginan selama 4 tahun yang ditunjukkan pada Tabel 1^[1].

Bahan pembentuk gelas (*glass frit*) yang digunakan adalah SiO₂ 62,3; B₂O₃ 19,0; Al₂O₃ 6,7; Li₂O 4,0; CaO 4,0; dan ZnO 4,0 % berat.

Tabel 1. Komposisi LCAT Dari Bahan Bakar Bekas PWR, Fraksi Bakar 45.000 MWD/MTU, Pengkayaan U 4,5 %, Tenaga Spesifik 38 MW/MTU Dan Pendinginan Selama 4 Tahun^[1]

Oksida	Rasio dalam limbah	Oksida	Rasio dalam limbah
Na ₂ O	0,16480	TeO ₂	0,00843
Fe ₂ O ₃	0,09047	Cs ₂ O	0,03905
NiO	0,01473	BaO	0,02575
Cr ₂ O ₃	0,01683	La ₂ O ₃	0,02051
P ₂ O ₅	0,00947	CeO ₂	0,04192
SeO ₂	0,00114	Pr ₆ O ₁₁	0,01936
Rb ₂ O	0,00557	Nd ₂ O ₃	0,06766
SrO	0,01446	Pm ₂ O ₃	0,00068
Y ₂ O ₃	0,00852	Sm ₂ O ₃	0,01218
ZrO ₂	0,06991	Eu ₂ O ₃	0,00248
MoO ₃	0,07192	Gd ₂ O ₃	0,00192
Tc ₂ O ₇	0,01672	ZrO ₂	0,02557
RuO ₂	0,04121	Gd ₂ O ₃	0,12129
Rh ₂ O ₃	0,00736	UO ₃	0,03806
PdO	0,02204	NpO ₂	0,00809
Ag ₂ O	0,00104	PuO ₂	0,00146
CdO	0,00176	Am ₂ O ₃	0,00525
SnO ₂	0,00153	Cm ₂ O ₃	0,00047
Sb ₂ O ₃	0,00037		

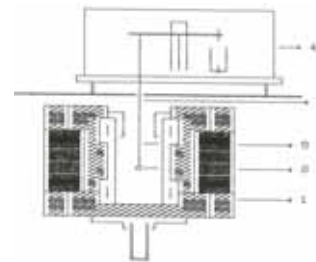
Pembuatan LCAT simulasi dilakukan dengan mengganti unsur-unsur aktif dengan non aktif yang jenis unsurnya sama, dan jika tidak ada didekati dengan unsur yang sifat kimianya sama. Penggantian unsur-unsur dilakukan dengan unsur lain yang terdapat dalam satu golongan pada tabel periodik unsur-unsur. Unsur pengganti mempunyai sifat kimia yang sama dengan unsur yang diganti, karena berada dalam satu golongan. Dalam hal ini, maka unsur Tc (teknesium) diganti dengan Mn (mangan), unsur aktinida (U, Np, Am, Pu, Cm) diganti dengan Ce (cerium) dan unsur prometium (Pm) diganti dengan Nd (neodimium). Pada pengukuran kekentalan ini grup platina (Ru, Rh, Pd) karena mengganggu dalam pengukuran maka diganti dengan unsur-unsur yaitu Ru diganti oleh Fe, Rh oleh Co dan Pd oleh Ni. Hasil perhitungan komposisi gelas-limbah dalam prosen berat dengan kandungan limbah 25 % berat ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Gelas-Limbah Simulasi Dalam Prosen Berat Dengan Kandungan Limbah 25 % Berat.

Oksida	Prosen berat	Oksida	Prosen berat
SiO ₂	46,55	BaO	0,47
B ₂ O ₃	14,20	ZrO ₂	1,75
Al ₂ O ₃	5,01	MoO ₃	1,31
Li ₂ O	2,99	MnO ₂	0,31
CaO	2,99	Ag ₂ O	0,02
ZnO	2,99	CdO	0,03
Na ₂ O	9,99	SnO ₂	0,03
P ₂ O ₅	0,17	SeO ₂	0,02
Fe ₂ O ₃	2,40	TeO ₂	0,15
Cr ₂ O ₃	0,31	Y ₂ O ₃	0,16
NiO	0,67	La ₂ O ₃	1,37
Gd ₂ O ₃	2,26	CeO ₂	0,77
CoO	0,13	Pr ₆ O ₁₁	0,35
Sb ₂ O ₃	0,01	Nd ₂ O ₃	1,25
Rb ₂ O	0,10	Sm ₂ O ₃	0,22
Cs ₂ O	0,71	Eu ₂ O ₃	0,05
SrO	0,26		

Alat

Skema alat viskometer bola jatuh ditunjukkan pada Gambar 1^[6]. Bola Pt berdiameter 9 mm digantungkan dengan kawat Pt yang berdiameter 0,3 mm pada lengan neraca kiri.



Gambar 1. Alat Viskometer Bola Jatuh^[6]

Keterangan :

1. Furnace
2. Bola platina
3. Kawat platina
4. Neraca analitik
5. Lelehan gelas

Cara Kerja

Penelitian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Ditimbang oksida-oksida penyusun gelas-limbah beratnya sesuai hasil perhitungan komposisi gelas-limbah dalam Tabel 2,

- kemudian dicampur dalam *crucibel* porselin sampai homogen.
2. Dilakukan pembentukan gelas-limbah dalam *crucibel* platina pada suhu 1150 °C selama 2,5 jam. *Annealing* pada 510 °C selama 2 jam dan selanjutnya didinginkan dengan kecepatan penurunan suhu 16,7 °C/jam^[1].
 3. Dipanaskan gelas-limbah sesuai suhu pengukuran. Lelehan gelas-limbah tersebut berada dalam *crucibel* Pt yang berdiameter 50 mm dan tingginya 70 mm. Tinggi lelehan gelas-limbah dalam *crucibel* Pt adalah 50 mm dan posisi terbawah dari bola Pt dalam lelehan gelas-limbah adalah 20 mm dari dasar *crucibel* Pt. Pada pengukuran kekentalan sesuai suhu yang diinginkan, suhu tersebut dipertahankan tetap selama 20 menit (waktu cukup untuk melakukan pengukuran). Termokopel Pt digunakan untuk mengukur suhu dan pada saat pengukuran kekentalan termokopel Pt dikeluarkan dari lelehan gelas-limbah.
 4. Dalam percobaan, waktu dari gerakan bola Pt ke atas sejauh 10 mm diukur untuk penambahan berbagai berat pada lengan neraca kanan. Kalibrasi alat dilakukan dengan gelas standar *National Bureau Standard* (NBS) 711 yang telah diketahui kekentalannya pada suhu tertentu. Dari percobaan kalibrasi diperoleh harga k (tetapan neraca) adalah 39,0. Harga k ini dipengaruhi oleh bola Pt, kawat Pt, dan *crucibel*.

5. Dengan cara di atas, percobaan untuk pengukuran kekentalan gelas-limbah dapat dilakukan dengan k yang telah diketahui.
6. Kekentalan lelehan gelas-limbah dihitung menggunakan persamaan :

$$k = \frac{\eta}{w(t - t_0)/x} \quad (1)$$

dengan:

η = kekentalan (poise)

k = tetapan neraca

w = berat beban yang ditambahkan pada papan neraca kanan (g)

t = waktu gerakan ke atas dari bola Pt sejauh 10 mm (detik)

t_0 = koreksi waktu, tergantung pada berat beban yang ada pada lengan neraca kanan (detik)

x = koreksi jarak (0,979 mm)

HASIL DAN PEMBAHASAN.

Karakteristik gelas-limbah sangat kompleks. Karakteristik gelas-limbah ini digunakan untuk operasi melter, disain canister, transportasi, penyimpanan sementara, dan disposal. Karakteristik gelas-limbah ini telah ditentukan. Jika karakteristik gelas-limbah ini dibandingkan dengan standar *Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation* (PNC), Tokai-Jepang^[1] dan standar *Pasific Northwest Laboratory* (PNL), Richland-Washington^[4] maka telah memenuhi persyaratan. Karakteristik gelas-limbah ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Karakteristik Gelas-limbah dibanding Standar PNC^[1] dan PNL^[4]

Karakteristik gelas-limbah	Standar PNC	Gelas-limbah	Standar PNL
Densitas	2,74 g/cm ³	2,75 g/cm ³	2,6 – 3,4 g/cm ³
Koefisien muai panjang	83 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹ (pada 30-300 °C)	88 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹ (pada 30-300 °C)	80 x 10 ⁻⁷ -100 x 10 ⁻⁷ °C ⁻¹ (pada 25-400 °C)
Titik transformasi	501 °C	502 °C	-
Hantaran panas	0,87 kkal/m ² .jam °C (pada 100 °C)	1,02 kkal/m ² .jam °C (pada 100 °C)	0,77 kkal/m ² .jam °C (pada 100 °C)
Titik pelunakan	604 °C	616 °C	-
Tahanan listrik	4,8 ohm.cm (pada 1150 °C)	5,2 ohm.cm (pada 1150 °C)	-
Kekentalan	40 poise (pada 1150 °C)	43 poise (pada 1150 °C)	100 – 500 poise (pada 1050 °C)
Laju pelindihan (statik, 100 °C, 24 jam)	2,3 x 10 ⁻⁵ g/cm ² hari	2,1 x 10 ⁻⁵ g/cm ² hari	1 x 10 ⁻⁴ – 1 x 10 ⁻⁷ g/cm ² hari
Panas jenis	0,21 kal/g °C (pada 100 °C)	-	0,17 kal/g °C (pada 200 °C)

*) Kekentalan gelas-limbah hasil pengukuran

Kekentalan lelehan gelas-limbah dihitung berdasarkan Persamaan 1. Dari Persamaan 1, nilai k , w , t , t_0 , dan x diketahui, sehingga η dapat dihitung. Persamaan umum tentang kekentalan yang dinyatakan oleh Vogel-Fulcher-Tammann merupakan fungsi logaritma, yaitu^[6,7]:

$$\log \eta = A + \frac{B}{T - T_0} \quad (2)$$

dengan A , B , dan T_0 adalah tetapan dan dapat ditentukan dengan mengukur kekentalan pada 3 suhu yang berbeda. Data kekentalan gelas-limbah sebagai fungsi suhu ditunjukkan pada Tabel 4. Perhitungan kekentalan sebagai fungsi suhu dengan Persamaan 2, diperoleh persamaan :

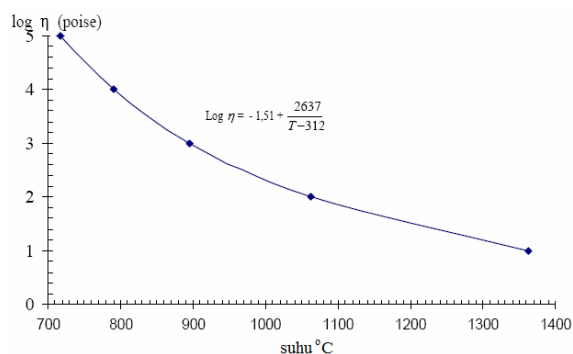
$$\log \eta = -1,51 + \frac{2637}{T - 312} \quad (3)$$

Dari Persamaan 3, maka suhu pada berbagai kekentalan dapat dihitung. Kekentalan gelas-limbah 10^5 poise pada suhu 717°C , 10^4 poise pada 790°C , 10^3 poise pada 896°C , 10^2 poise pada 1063°C dan 10 poise pada 1362°C . Grafik Persamaan 3 ditunjukkan pada Gambar 2.

Berdasarkan Persamaan 3 dan Gambar 2, kekentalan gelas-limbah pada suhu 1150°C adalah 43 poise dan pada suhu 1050°C adalah 115 poise. Jika kekentalan gelas-limbah hasil vitrifikasi ini dibandingkan dengan kekentalan gelas-limbah standar PNC-Jepang yaitu 40 poise pada 1150°C ,^[1] dan gelas-limbah standar PNL-Amerika Serikat yaitu 100 - 500 poise pada 1050°C ,^[4] maka gelas-limbah hasil vitrifikasi ini masih memenuhi syarat dan dapat dituang dari melter ke dalam canister pada suhu penuangan sekitar 1000°C .

Tabel 4. Pengukuran Kekentalan Gelas-Limbah Pada Berbagai Suhu.

Suhu ($^\circ\text{C}$)	Berat (g)	t_{rerata} (detik)	t_0	$t-t_0$	k	kekentalan (poise)	kekentalan rerata (poise)
1100	0,18	10,15	0,61	9,74	39,0	68,37	68,33
	0,13	14,37	0,71	14,05		71,23	
	0,10	17,23	0,81	16,77		65,40	
1052	0,25	11,68	0,52	11,40		111,15	112,62
	0,20	14,69	0,57	14,42		112,48	
	0,17	17,50	0,63	17,23		114,23	
1004	0,45	11,37	0,39	11,21		196,73	198,94
	0,35	14,72	0,44	14,59		199,15	
	0,28	18,49	0,48	18,40		200,93	
953	0,87	11,64	0,28	11,60		393,59	394,31
	0,70	14,49	0,31	14,48		395,30	
	0,55	18,33	0,35	18,37		394,04	



Gambar 2. Kekentalan Gelas-Limbah Sebagai Fungsi Suhu

Pada industri gelas, umumnya peleburan gelas-limbah dilakukan pada suhu di atas titik lebur yaitu $\pm 1150^\circ\text{C}$. Kondisi ini tidak ekonomis karena adanya kelebihan panas yang dibuang. Sesuai definisi, yang dimaksud titik lebur gelas-limbah yang merupakan bahan amorf adalah suhu dimana kekentalan gelas-limbah 100 poise. Berdasarkan Persamaan 3 dan Gambar 2, maka pada kekentalan 100 poise, diperoleh suhu 1074°C . Suhu 1074°C ini merupakan suhu peleburan gelas-limbah yang akan digunakan dalam operasi rutin pada skala industri. Jika dibandingkan dengan suhu

peleburan gelas-limbah pada skala laboratorium yang masih merupakan prakiraan atau prediksi, maka hasil pengukuran kekentalan gelas-limbah untuk operasi industri mempunyai keuntungan, yaitu :

1. Penurunan suhu 76 °C, sehingga menghemat energi atau panas peleburan.
2. Suhu peleburan gelas-limbah lebih rendah sehingga umur melter lebih panjang karena makin rendah suhu makin rendah laju korosinya. Ini berarti limbah padat sekunder yang timbul makin sedikit.

Gelas-limbah dikeluarkan dari melter ke canister (wadah dari baja tahan karat 304L) dengan memanaskan *drain nozzle melter* pada suhu 1000 °C. Pada suhu tersebut kekentalan gelas-limbah 235 poise.

Titik *annealing* adalah suhu ketika kekentalan gelas-limbah 10^{13} poise. Dari Persamaan 3 dan Gambar 2, diperoleh titik *annealing* gelas-limbah pada suhu 494 °C. Titik *annealing* ini digunakan untuk perlakuan panas gelas-limbah, sehingga tegangan sisa gelas-limbah hilang dan gelas-limbah tidak retak.

Laju pertumbuhan kristal berbanding terbalik dengan kekentalan gelas-limbah seperti yang disajikan oleh Swift dalam persamaan berikut^[8]:

$$R = \frac{k}{\eta^\alpha} (T_g - T) \quad (4)$$

dengan :

R = laju pertumbuhan kristal pada suhu T

η = kekentalan gelas-limbah

k dan α = tetapan untuk gelas

T_g = suhu transformasi

Suhu transformasi adalah suhu ketika terjadi perubahan bentuk dari lelehan gelas-limbah menjadi padat saat pendinginan. Suhu transformasi ini tergantung pada laju pendinginan. Makin cepat laju pendinginan maka suhu transformasi makin tinggi. Titik transformasi ini dapat ditentukan dengan alat dilatometer. Jadi jika kekentalan kecil, maka terjadinya kristalisasi gelas-limbah (devitrifikasi) makin besar. Terjadinya devitrifikasi harus dihindari, karena hal tersebut akan menaikkan laju pelindihan radionuklida dari dalam gelas-limbah ke lingkungan^[9].

KESIMPULAN

Hubungan kekentalan gelas-limbah fungsi suhu dinyatakan oleh persamaan :

$$\log \eta = - 1,51 + 2637/(T-312)$$

Berdasarkan persamaan tersebut kekentalan gelas-limbah pada suhu 1150 °C adalah 43 poise dan pada suhu 1050 °C adalah 115 poise. Jika kekentalan gelas-limbah tersebut dibandingkan dengan kekentalan gelas-limbah standar PNC-Jepang yaitu 40 poise pada 1150°C dan gelas-limbah standar PNL-AS yaitu 100-500 poise pada 1050 °C, maka gelas-limbah hasil vitrifikasi ini masih memenuhi syarat. Pada suhu 1150 °C kekentalan gelas-limbah hasil vitrifikasi ini jika dibandingkan dengan standar kekentalan gelas-limbah PNC-Jepang, sedikit lebih tinggi atau lebih kental. Dari Persamaan kekentalan gelas-limbah tersebut diperoleh suhu peleburan 1074 °C, penguangan lelehan gelas-limbah dari melter ke canister pada 1000 °C, titik *annealing* 494 °C. Dengan penentuan kekentalan ini diperoleh penghematan energi pada proses peleburan dan mengurangi terjadinya limbah padat sekunder. Dalam proses vitrifikasi skala industri untuk imobilisasi limbah cair aktivitas tinggi, proses *annealing* tidak dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

1. SASAKI N., 1992, "Solidification of The High Level Liquid Waste From The Tokai Reprocessing Plant", PNC-Japan.
2. MARTONO H., 1988, "Characterization of Waste-Glass and Treatment of High Level Liquid Waste", Report at Tokai Work, JNC-Japan.
3. AISYAH, dkk., 1997, "Pengaruh Kandungan Silika, Alumina, dan Ferri Oksida Terhadap Laju Pelindihan Gelas-Limbah", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PPNY-BATAN, Yogyakarta.
4. MENDEL J.E., 1985, "The Fixation of High Level Waste in Glasses", PNL Richland, PNL SA-129, Washington, May.
5. HLAVAC, J.A., 1983, "The Technology of Glass and Ceramics", Elsevier Scientific Publishing Company, New York.

6. STANEK J., 1987, "Electric Melting of Glass, Department of Silicates", Institute of Chemical Technology Prague, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
7. TATA SURDIA, S. SAITO, 1984, "Pengetahuan Bahan Teknik", PT. Pradnya Paramita, Jakarta.
8. FAY V. TOOLEY, 1987, "Handbook of Glass Manufacture", Department of Ceramic Engineering, University of Illinois, Odgen Publishing Company, New York.
9. SURYANTORO, dkk., 1995, "Pengaruh Devitrifikasi Terhadap Laju Pelucutan Gelas yang Mengandung Limbah Cair Aktivitas Tinggi Simulasi", Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, PPNY-BATAN, Yogyakarta.

