

## DIFUSI KARBON AKIBAT PELAPISAN GRAFIT PADA KELONGSONG ZIRCALOY-2

Sugondo, Mujinem dan M.M. Lilis Windaryati

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong 15314, Tangerang

### ABSTRAK

**DIFUSI KARBON AKIBAT PELAPISAN GRAFIT PADA KELONGSONG ZIRCALOY-2.** Telah dilakukan penelitian difusi karbon ke dalam zircaloy-2 akibat pelapisan grafit. Sebagai variabel ialah waktu dan suhu pemanasan. Bahan yang digunakan ialah kelongsong zircaloy-2 sebagai kelongsong elemen bakar reaktor Cirene. Variasi suhu pemanasan 450 °C, 500 °C dan 550 °C. Variasi waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam dan 8 jam. Identifikasi kadar karbon dengan Leco IR-212. Kesimpulan hasil penelitian adalah kadar karbon, pada interval suhu antara 450 °C sampai dengan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam sampai dengan 8 jam kadar karbon meningkat dari 0,03526 wt% menjadi 0,3055wt%. Entalpi, Pada interval suhu dan waktu tersebut adalah antara 6,1722E+03 cal mol<sup>-1</sup> dan 2,1127E+04 cal mol<sup>-1</sup>. Entropi antara 3,9881E+03 cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> dan 2,3280E+08 cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Rasio ekspansi volume pelelehan antara 35,64% dan 10,41%. Difusivitas antara (1,6683E-12 ± 7,2712E-13) cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> dan (1,1565E-11 ± 4,2483) cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. Energi aktivasi antara 5,21085E-08 cal mol<sup>-1</sup> dan 1,40353E-07 cal mol<sup>-1</sup>.

**Kata kunci :** Zircaloy-2, difusilitas karbon, entalpi, entropi, energi aktivasi

### ABSTRACT

#### **CARBON DIFFUSION AS THE EFFECT OF GRAFIT COATING ON ZIRCALOY-2 CLADDING.**

It was performed the research on carbon diffusion into zircaloy-2 as the effect of grafit coating. The variables were the time and the temperature of the heating. The material was the zircaloy-2 cladding as the fuel element cladding of Cirene reactor. The temperature variation were 450 °C, 500 °C, and 550 °C. The time variation were 2 hours, 4 hours, 6 hours, and 8 hours. The carbon content was identified by Leco IR-212. The concluded results were as follow: The carbon content at the temperature in between 450 °C to 550 °C with the heating time for 2 hours to 8 hours were increased from 0.03526 wt% to 0.3055wt%. The enthalpy, at the range of the temperature and the time were 6.1722E+03 cal mol<sup>-1</sup> to 2.1127E+04 cal mol<sup>-1</sup>. The entropy were 3.9881E+03 cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup> to 2.3280E+08 cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. The expansion volume ratio of the fusion were 35.64% to 10.41%. The diffusivity were (1.6683E-12 ± 7.2712E-13) cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> and (1.1565E-11 ± 4.2483) cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>. The energy activation were 5.21085E-08 cal mol<sup>-1</sup> dan 1.40353E-07 cal mol<sup>-1</sup>.

**Key words :** Zircaloy-2, carbon diffusivity, enthalpy, entropy, activation energy

### PENDAHULUAN

Zircaloy-2 merupakan bahan kelongsong salah satu reaktor jenis *pressurized heavy water reactor (PHWR)*, seperti Cirene yang ada di BTBBRD-PTBBN. Spesifikasi kelongsong sebagai berikut: Panjang 500 mm, diameter luar 20 mm, tebal kelongsong 0,46 mm. Dari individu kelongsong dibuat berkas elemen bakar yang disebut *bundle*, dengan spesifikasi: panjang 500 mm termasuk tutup dan diameter berkas 104,6 mm [1].

Bagian dalam kelongsong dilapis grafit sebagai pelapis saat memasukkan pelet ke dalam kelongsong. Pada proses pelapisan kelongsong dipanaskan pada suhu 450°C. Pemanasan pada suhu ini diperkirakan ada karbon yang berdifusi ke dalam zircaloy-2 [2].

Untuk itu dilakukan penelitian difusi karbon ke dalam zircaloy-2 akibat pelapisan karbon. Sebagai variabel ialah waktu pemanasan dan suhu pemanasan.

### TEORI

#### Difusi

Difusi adalah suatu proses yang mana atom bergerak dari satu *site*, dalam kristal, ke *site* yang lain. Seperti proses yang lain bahwa difusi terjadi akibat penurunan energi bebas. Terjadinya proses difusi mengindikasikan bahwa atom tidak pernah tinggal diam dalam kristal, terus menerus mengalami vibrasi. Amplitudo vibrasi bertambah besar dengan naiknya suhu dan memungkinkan terjadinya perubahan tempat (*place change*). Perubahan tempat ini erat kaitannya dengan ketidak sempurnaan kristal (*crystal imperfections*). Pada kristal yang tidak sempurna, energinya lebih rendah daripada kristal sempurna.

Pada suhu nol absolut (0 K), kristal dalam keadaan stabil, atom diam pada posisinya di kisi kristal, kristal disebut sempurna. Jika suhu dinaikkan maka ada

peningkatan probabilitas atom terlempar dari tempat di kisi (*lattice site*) dan terbentuk kekosongan (*vacancy*). Dalam pembentukan kekosongan *Schottky* (*Schottky vacancy*), atom yang terlepas diasumsikan menuju ke permukaan atau batas butir kristal, tetapi dislokasi (*dislocations*) menyediakan tempat atom yang terlepas. Jika  $G$  adalah energi bebas ekstra kristal yang mengandung satu kekosongan relatif terhadap kristal sempurna maka di setiap suhu terjadi kesetimbangan konsentrasi kekosongan. Jika  $n$  adalah jumlah kekosongan dalam kristal yang mengandung  $N$  atom, maka terjadi korelasi termodinamik sebagai berikut [3]:

$$n/N = \text{Exp}(-G/RT) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:  $R$  adalah konstanta gas ( $1,986 \text{ cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) dan  $T$  adalah suhu  $K$ .

Eksponensial persamaan ini berarti bahwa kekosongan meningkat cepat dengan suhu. Terjadinya kekosongan bukan karena kesalahan pembuatan sampel tetapi akibat vibrasi kisi. Jadi keadaan stabil kristal jika energi bebas terendah dan terjadi kesetimbangan kekosongan. Pada saat terjadi kekosongan maka atom terdekat mengisi dan timbul kekosongan baru. Proses ini terjadi secara kontinyu dan terjadi mobilitas atom. Berdasarkan konsentrasi kekosongan, untuk logam secara umum, diperoleh korelasi entalpi formasi ( $\Delta H_f$ ) dan entalpi fusi ( $\Delta H_L$ ) yang diformulasikan pada persamaan-2, dimana  $\Delta V/V$  adalah fraksi ekspansi volume pelepasan [4].

$$\Delta H_f = 0,4 (V/\Delta V) \Delta H_L \dots\dots\dots (2)$$

Di bawah titik leleh, konsentrasi kekosongan ( $c$ ) diformulasikan sebagai berikut [4]:

$$c = (\Delta S/R) \exp(-\Delta H_f/RT) \dots\dots\dots (3)$$

dimana  $\Delta S$  adalah perubahan entropi formasi dan  $\Delta H_f$  panas laten formasi.

Disamping kekosongan *Schottky* juga ada kekosongan Frenkel (*Frenkel vacancy*). Pada kekosongan *Frenkel* atom yang terlepas menempati posisi interstisi (*interstitial position*). Setelah interstisi terjadi maka atom mencari tempat interstisi yang lain atau terjadi kombinasi interstisi dan kekosongan. Selanjutnya terjadi mobilitas atom dan konsentrasi kekosongan *Frenkel* sama dengan kekosongan *Schottky*.

Adanya kekosongan memfasilitasi terjadinya difusi karena setelah terbentuk kekosongan maka atom lain dapat masuk ke dalam kristal secara substitusi atau interstisi dengan sedikit energi aktivasi. Konstanta difusi bahan bervariasi dengan suhu melalui mekanisme aktivasi, dengan formulasi sebagai berikut [5]:

$$D = D_0 \exp(-Q/RT) \dots\dots\dots (4)$$

dimana  $Q$  adalah energi aktivasi dalam  $\text{cal mol}^{-1}$ ,  $R$  adalah konstanta gas ( $1,986 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}$ ),  $T$  adalah suhu dalam  $K$ ,  $D_0$  adalah prefaktor difusi dalam  $\text{cm s}^{-1}$ . Secara

eksperimental dengan kurva  $D$  terhadap  $1/T$  maka dapat diperoleh  $D_0$  dan  $Q$ .

Suatu proses difusi dari suatu bahan yang mempunyai konsentrasi di permukaan konstan dan berdifusi ke dalam suatu sistem heterogen maka *interface* (jarak kedua fasa tersebut) mengikuti korelasi akar waktu. Sehingga diperoleh konsentrasi rerata dalam sistem heterogen sebagai berikut [6].

$$\bar{C} = 2,845 D^{1/2} t^{1/2}/h \dots\dots\dots (5)$$

dimana  $\bar{C}$  adalah konsentrasi rerata dalam  $\text{g mol mL}^{-1}$ ,  $D$  adalah konstanta difusi dalam  $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$ ,  $t$  adalah waktu dalam  $s$ , dan  $h$  adalah tebal bahan dalam  $\text{cm}$ . Secara eksperimental dengan membuat kurva terhadap  $t^{1/2}$  maka diperoleh  $D$ .

## METODE PERCOBAAN

Bahan kelongsong zircaloy-2 sebagai kelongsong elemen bakar reaktor Cirene yang berdiameter luar 18,0 mm dan tebal 0,46 mm dipotong dengan panjang 10 mm. Sampel dicuci dengan alkohol dan dilanjutkan menggunakan ultrasonik dalam larutan campuran air dan aseton dengan perbandingan 5 : 1, pencucian dilakukan selama 30 menit, dikeringkan dan dimasukkan ke dalam desikator. Selanjutnya bagian luar sampel dibalut dengan kertas kalkir dan dikuatkan dengan isolasi untuk melindungi bagian luar agar tidak terkena grafit. Dibuat koloid dengan densitas grafit 0,85 g/mL. Sampel dicelupkan selama 15 detik. Sampel yang telah dicelup koloid grafit dikeringkan dalam udara pada suhu kamar selama 24 jam dan dilanjutkan pada suhu 90 °C selama satu jam. Pemanggangan dilakukan dalam tungku tabung dengan atmosfer gas argon. Variasi suhu pemanggangan 450 °C, 500 °C, and 550 °C. Variasi waktu pemanggangan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam. Sampel dipotong dengan panjang 1 mm dan dibersihkan lapisan grafitnya. Kemudian diambil sebanyak  $\pm 1$  gram untuk diidentifikasi kadar karbonnya. Identifikasi kadar karbon dengan Leco IR-212, di PTBBN-BATAN

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Kalibrasi Identifikasi Kadar Karbon

Kalibrasi identifikasi dilakukan menggunakan tiga bahan standar dengan kadar karbon 0,0097 wt%, 0,0348 wt%, dan 0,064 wt%. Identifikasi dilakukan lima kali pengulangan. Hasil kalibrasi identifikasi karbon sebagai berikut: Bahan standar 0,0097wt%, 0,0348 wt%, dan 0,064 wt% berturut-turut mempunyai simpangan baku sebesar 0,0014wt%, 0,0013wt%, dan 0,002wt%. Sebagai bahan blangko digunakan zircaloy-2 tanpa dilapis grafit. Diperoleh kadar karbon rerata dalam zircaloy-2 sebesar 0,00551wt%  $\pm$  0,000584wt%. Jadi alat penganalisis kadar

### Difusi Karbon Akibat Pelapisan Grafit pada Kelongsong Zircaloy-2 (Sugondo)

karbon layak untuk identifikasi kadar karbon dalam zircaloy-2.

## Analisis Kadar Karbon Akibat Pelapisan Grafit

Hasil analisis kadar karbon dapat dilihat pada Tabel 1. Sampel zircaloy-2 adalah kelongsong bahan bakar Cirene dengan diameter luar 20 mm dan tebal 0,46 mm. Sisi bagian dalam kelongsong dilapis dengan grafit. Tebal lapisan grafit adalah  $7,0149 \times 10^{-4}$  g/mm<sup>2</sup> sampai  $7,3333 \times 10^{-4}$  g/mm<sup>2</sup>. Setelah dilapis grafit dipanaskan pada suhu 450 °C, 500 °C, dan 550 °C dengan variasi waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam dan 8 jam. Berdasarkan Tabel 1, kadar karbon meningkat dengan naiknya suhu dan waktu pemanasan.

**Tabel 1.** Kadar karbon zircaloy-2 akibat pelapisan grafit pada berbagai variasi waktu dan suhu.

Waktu (Jam)	Temperatur, (°C)	Kadar C, % Dalam Zry2
2	450	0,03526
	500	0,05147
	550	0,05748
4	450	0,04978
	500	0,1204
	550	0,1655
6	450	0,0746
	500	0,17405
	550	0,25185
8	450	0,05766
	500	0,2238
	550	0,3055

Pada interval suhu antara 450 °C sampai dengan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, kadar karbon meningkat dari 0,03526 wt% menjadi 0,05748wt%. Kadar karbon meningkat dari 0,04978 wt% menjadi 0,1655wt% untuk waktu pemanasan 4 jam, dari 0,0746 wt% menjadi 0,2518wt% untuk waktu pemanasan 6 jam, dan dari 0,05766 wt% menjadi 0,3055wt% untuk waktu pemanasan 8 jam.

Kenaikan kadar karbon mengikuti teori kekosongan dengan korelasi persamaan 3. Berdasarkan persamaan ini diperoleh garis lurus jika dibuat kurva logaritmik konsentrasi (lnc, c dalam mol/mol) terhadap kebalikan suhu pemanasan (1/K). Kurva ini dapat dilihat pada Gambar 3 dan datanya dapat dilihat di Tabel 3. Dari lnc terhadap 1/T diperoleh kemiringan(slope) dengan variasi waktu pemanasan, Tabel 3. Untuk waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam dan 8 jam, harga kemiringan berturut-turut adalah  $-3,1079 \times 10^3$ ,  $-7,6160 \times 10^3$ ,  $-7,6887 \times 10^3$ , dan  $-1,0638 \times 10^4$ . Dari harga kemiringan dapat diperoleh entalpi(panas laten) formasi kekosongan, berdasarkan korelasi persamaan 3. Harga

entalpi formasi dapat dilihat di Tabel 3. Terlihat bahwa harga entalpi meningkat dengan waktu pemanasan. Pada interval suhu antara 450 °C dan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam diperoleh harga entalpi formasi berturut-turut sebesar  $6,1722 \times 10^3$  cal mol<sup>-1</sup>;  $1,5125 \times 10^4$  cal mol<sup>-1</sup>;  $1,5270 \times 10^4$  cal mol<sup>-1</sup>; dan  $2,1127 \times 10^4$  cal mol<sup>-1</sup>. Berdasarkan persamaan 3, entalpi seharusnya independen terhadap waktu, tetapi berdasarkan data, entalpi bertambah besar dengan bertambah lamanya waktu pemanasan.

Naiknya entalpi formasi kemungkinan besar akibat meningkatnya karbon masuk ke dalam zircaloy-2. Karbon yang masuk ke dalam zircaloy-2 ada yang terlarut dan ada yang bereaksi dengan zirconium membentuk senyawa ZrC. Senyawa ini merupakan senyawa kedua dalam matriks zirconium. Adanya penambahan solut (zat terlarut) dalam matriks dapat meningkatkan entalpi bahan. Selain itu juga ada penambahan fasa kedua dari unsur-unsur pepadu lain. Mengingat pada interval suhu 450 °C sampai dengan 550 °C merupakan daerah pertumbuhan presipitat.

## Entropi Formasi Kekosongan( $\Delta S_f$ )

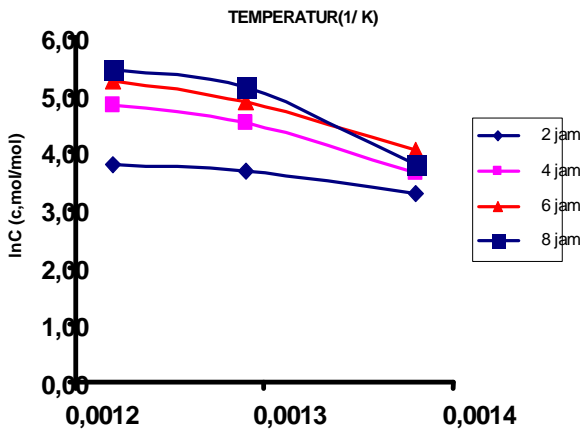
Dari titik potong (*intercept*) kurva lnc terhadap 1/T juga dapat diperoleh entropi formasi kekosongan. Entropi kekosongan dapat dilihat di Tabel-2.

**Tabel 2.** Data suhu pemanasan(1/K), logaritmik kadar karbon(lnc), Entalpi, Entropi, dan rasio volume pelelehan(DV/V) pada pelapisan grafit zircaloy-2 dengan berbagai variasi waktu.

1/T	lnc(mol/mol)			
	2 jam	4 jam	6 jam	8 jam
0,00138	3,29	3,63	4,04	3,78
0,00129	3,66	4,51	4,88	5,13
0,00122	3,77	4,83	5,25	5,45
Hasil Regresi				
Slope	$3,1079 \times 10^3$	$-7,6160 \times 10^3$	$-7,6887 \times 10^3$	$-1,0638 \times 10^4$
Intercept	$7,6049 \times 10^0$	$1,4201 \times 10^1$	$1,4693 \times 10^1$	$1,8580 \times 10^1$
R <sup>2</sup>	0,946	0,963	0,977	0,926
Fungsi Termodinamik				
Entalpi, cal/mol	$6,1722 \times 10^3$	$1,5125 \times 10^4$	$1,5270 \times 10^4$	$2,1127 \times 10^4$
Entropi, cal/mol K	$3,9881 \times 10^3$	$-2,9207 \times 10^6$	$-4,7767 \times 10^6$	$-2,3280 \times 10^8$
? V/V	$-3,5644 \times 10^{-1}$	$-1,4545 \times 10^{-1}$	$-1,4408 \times 10^{-1}$	$-1,0413 \times 10^{-1}$

Pada interval suhu 450°C sampai 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam dan 8 jam, entropi formasi berturut-turut adalah  $3,9881 \times 10^3$  cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>,  $2,9207 \times 10^6$  cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>,  $4,7767 \times 10^6$ , cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, dan  $2,3280 \times 10^8$  cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>. Berdasarkan persamaan 3 entropi seharusnya independen terhadap waktu, tetapi kenyataannya meningkat dengan bertambahnya waktu.

Menurut Gibbs-Duhem, pada proses isothermal dan terjadi proses kesetimbangan maka tidak



Gambar 1. Kurva kadar karbon-lnC(mol/mol) terhadap suhu (1/T) dalam zircaloy-2 akibat pelapisan grafit.

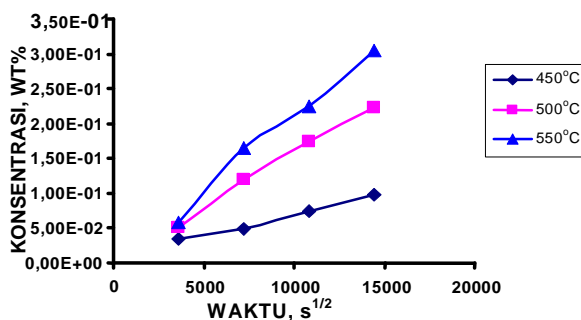
ada penambahan entalpi, maka total perubahan entropi adalah [11].

$$\Delta S = -R \sum n_i \ln x_i \dots\dots\dots (6)$$

Dimana  $n_i$  adalah mol spesies  $i$ ,  $x_i$  adalah fraksi spesies  $i$ , dan R adalah konstanta gas.

Tabel 3. Data waktu pemanasan s<sup>1/2</sup>, konsentrasi karbon wt%, dan difusivitas(D) cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>.

Waktu, s <sup>1/2</sup>	Kadar C(wt%) dalam Zry-2		
	450 °C	500 °C	550 °C
3600	3,5260E-02	5,1470E-02	5,7480E-02
7200	4,9780E-02	1,2040E-01	1,6550E-01
10800	7,4600E-02	1,7405E-01	2,5185E-01
14400	5,7660E-02	2,2380E-01	3,0550E-01
Difusivitas(D), cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			
D, 2 jam	2,5079E-12	5,3439E-12	6,6647E-12
D, 4 jam	1,2497E-12	7,3104E-12	1,3813E-11
D, 6 jam	1,2473E-12	6,7897E-12	1,4216E-11
D, 8 Jam	4,1916E-13	6,3146E-12	1,1767E-11
Analisis Statistik			
Rerata	1,6683E-12	6,4813E-12	1,1565E-11
STDV	7,2712E-13	1,0189E-12	4,2483E-12



Gambar 2. Kurva kadar karbon(wt%) terhadap waktu (√t) dalam zircaloy-2 akibat pelapisan grafit.

Pemanasan zircaloy-2 yang dilapis grafit pada suhu tetap dan variasi waktu termasuk proses isothermal,

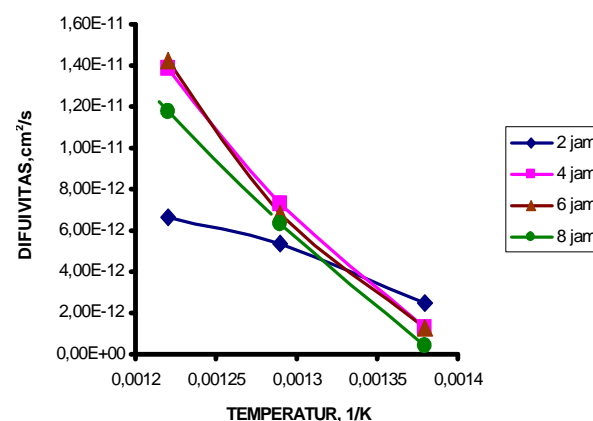
maka mengikuti korelasi persamaan-5. Dengan bertambahnya karbon dalam zircaloy-2 berarti  $n_i$  dan  $x_i$  bertambah besar dan sebagai akibatnya entropi juga menjadi naik.

### Rasio Ekspansi Volume Pelelehan(ΔV/V)

Rasio volume pelelehan dapat diperoleh dari entalpi formasi. Korelasi entalpi formasi dengan ekspansi volume pelelehan ditunjukkan pada persamaan-2. Dengan menggunakan panas fusi sebesar 5500 cal mol<sup>-1</sup> maka didapatkan rasio ekspansi volume pelelehan pada pemanasan isothermal, Tabel-4. Pada interval suhu pemanasan 450 °C sampai dengan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, rasio ekspansi volume pelelehan adalah -3,5644E-01; -1,4545E-01; -1,4408E-01; dan -1,0413E-01. Dari data tersebut rasio ekspansi volume pelelehan turun dengan bertambahnya waktu pemanasan. Jika dinyatakan dalam persen, rasio ekspansi volume pelelehan negatif (pengkerutan) berturut-turut adalah 35,64%; 14,54%; 14,41%; dan 10,41%.

Tabel 4. Data suhu pemanasan(1/K), Difusivitas(cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>), Entropi (cal mol<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>), Do(cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) pada pelapisan grafit zircaloy-2 dengan berbagai variasi waktu.

TEMPERATUR, 1/K	DIFISIVITAS, cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>			
	2 jam	4 jam	6 jam	8 jam
0,00138	2,51E-12	1,25E-12	1,25E-12	4,19E-13
0,00129	5,34E-12	7,31E-12	6,79E-12	6,31E-12
0,00122	6,66E-12	1,38E-11	1,42E-11	1,18E-11
Analisis Regresi				
Slope	-2,62379E-08	-7,79993E-08	-8,01463E-08	-7,06713E-08
Intercept	3,88607E-11	1,08597E-10	1,11341E-10	9,7804E-11
R <sup>2</sup>	0,9818	0,9490	0,9960	0,9888
Fungsi Termodinamik				
Energi Aktivasi, cal mol <sup>-1</sup>	5,21085E-08	1,54907E-07	1,59171E-07	1,40353E-07
Do, cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>	1	1	1	1



Gambar 3. Difusivitas cm<sup>2</sup>s<sup>-1</sup> terhadap suhu (1/T) dalam zircaloy-2 akibat pelapisan grafit.

### Difusivitas(D)(konstanta difusi) Sebagai Fungsi Waktu Pemanasan

Difusivitas sebagai fungsi waktu pemanasan dapat dihitung dari persamaan-5. Kurva konsentrasi( $\bar{C}$ )

terhadap waktu pemanasan ( $\sqrt{t}$ ) adalah garis lurus yang dapat dilihat pada Gambar-4 dan datanya di Tabel-4. Dengan demikian difusivitas ( $D$ ) dapat dihitung untuk masing-masing kondisi. Untuk suhu 450 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, difusivitas berturut-turut adalah  $2,5079E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $1,2497E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ,  $1,2473E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  dan  $4,1916E-13$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ . Selanjutnya untuk suhu 500 °C adalah  $5,3439E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $7,3104E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $6,7897E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  dan  $6,3146E-13$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  dan untuk suhu 550 °C adalah  $6,6647E-12$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $1,3813E-11$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ;  $1,4216E-11$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$  dan  $1,1767E-11$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ .

Berdasarkan data, difusivitas secara umum tidak terpengaruh oleh waktu pemanasan. Dengan demikian dapat diambil harga difusivitas rerata. Pada interval waktu pemanasan antara 2 jam sampai dengan 8 jam dengan suhu pemanasan pada 450 °C, 500 °C dan 550 °C, difusivitas rerata adalah  $(1,6683E-12 \pm 7,2712E-13)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ,  $(6,4813E-12 \pm 1,0189E-12)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , dan  $(1,1565E-11 \pm 4,2483)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ .

### Energi Aktivasi Difusi(Q) dan Prefaktor Difusivitas(D<sub>0</sub>)

Energi aktivasi dapat dihitung dari persamaan-4. Kurva difusivitas terhadap 1/T dapat dilihat pada Gambar-5 dan datanya dapat dilihat di Tabel-5. Pada interval waktu 450°C sampai dengan 550°C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, energi aktivasi pemanasan difusi karbon ke dalam zircaloy-2 berturut-turut adalah  $5,21085E-08$   $\text{cal mol}^{-1}$ ,  $1,54907E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ ,  $1,54907E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ , dan  $1,40353E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ . Terlihat dari data bahwa energi aktivasi karbon ke dalam zircaloy-2 relatif kecil, tetapi entalpi untuk formasi kekosongan sehingga terjadi difusi cukup besar.

### KESIMPULAN

1. Kadar karbon, pada interval suhu antara 450 °C sampai dengan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam dan 8 jam kadar karbon meningkat berturut-turut dari 0,03526 wt% menjadi 0,05748wt%; dari 0,04978 wt% menjadi 0,1655wt%; dari 0,0746 wt% menjadi 0,2518wt%; dan dari 0,05766 wt% menjadi 0,3055wt%.
2. Entalpi, pada interval suhu antara 450 °C dan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam diperoleh harga entalpi formasi berturut-turut sebesar  $6,1722E+03$   $\text{cal mol}^{-1}$ ;  $1,5125E+04$   $\text{cal mol}^{-1}$ ;  $1,5270E+04$   $\text{cal mol}^{-1}$ ; dan  $2,1127E+04$   $\text{cal mol}^{-1}$ .
3. Entropi, pada interval suhu 450 °C sampai dengan 550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, entropi formasi berturut-turut adalah  $3,9881E+03\text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $2,9207E+06\text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ ,  $4,7767E+06\text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ , dan  $2,3280E+08\text{cal mol}^{-1}\text{K}^{-1}$ .
4. Rasio ekspansi volume pelelehan(pengkerutan), pada interval suhu pemanasan 450 °C sampai dengan

550 °C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, rasio ekspansi volume pelelehan adalah 35,64%; 14,54%; 14,41%; dan 10,41%.

5. Difusivitas, pada interval waktu pemanasan antara 2 jam sampai dengan 8 jam dengan suhu pemanasan pada 450 °C, 500 °C dan 550 °C, difusivitas rerata adalah  $(1,6683E-12 \pm 7,2712E-13)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ ,  $(6,4813E-12 \pm 1,0189E-12)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ , dan  $(1,1565E-11 \pm 4,2483)$   $\text{cm}^2\text{s}^{-1}$ .
6. Energi aktivasi, pada interval waktu 450°C sampai dengan 550°C dengan waktu pemanasan 2 jam, 4 jam, 6 jam, dan 8 jam, energi aktivasi pemanasan difusi karbon ke dalam zircaloy-2 berturut-turut adalah  $5,21085E-08$   $\text{cal mol}^{-1}$ ,  $1,54907E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ ,  $1,54907E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ , dan  $1,40353E-07$   $\text{cal mol}^{-1}$ .

### DAFTARACUAN

- [1]. BENJAMIN M., *Nuclear Reactor Material and Application*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 7 (1983) 302-304, 394-466.
- [2]. LAMBERT J.D.B. and STRAIN R., *Oxide Fuels*, Materials Science and Technology, VCH, Germany, 10A, 121
- [3]. HUME-ROTHERY, *The Structures of Alloys of Iron*, Pergamon Press, London, (1969) 68
- [4]. MEHL R.F., SWANSON M., and POUND G.M., *Acta Met.* 9 (1961) 256, in HUME-ROTHERY, *The Structures of Alloys of Iron*, Pergamon Press, London (1969) 69
- [5]. BURN G., *Solid State Physics*, Academic Press, Inc, Orlando, (1985) 390
- [6]. LUSTMAN B., *Corrosion of Zirconium and Its Alloys*, in LUSTMAN B. and KERZE F.J.R., *The Metallurgy of Zirconium*, 1<sup>st</sup> Ed., McGraw-Hill, Inc, New York, (1955) 805
- [7]. KYLE B.G., *Chemical and Process Thermodynamics*, Prentice-Hall, Inc., New Jersey (1984) 410