

---

## PEMBUATAN *GREEN PELLETS* U-ZrH<sub>x</sub> UNTUK BAHAN BAKAR PWR

**Masrukan K, M. Husna Al Hasa, Anwar Muchsin**

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)-BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang 15313

e-mail: Masrukan2006@yahoo.com

(Naskah diterima: 16-12-2014, disetujui: 27-01-2014)

### ABSTRAK

**PEMBUATAN *GREEN PELLETS* U-ZrH<sub>x</sub> UNTUK BAHAN BAKAR PWR.** Bahan bakar U-ZrH<sub>x</sub> merupakan bahan bakar PWR pengganti UO<sub>2</sub> yang selama ini digunakan. Pemilihan bahan bakar U-ZrH<sub>x</sub> disebabkan bahan bakar tersebut dapat menempatkan hidrogen sebagai moderator secara langsung di dalam bahan bakar yang memungkinkan reaktor dapat beroperasi pada temperatur yang relatif tinggi (hingga 750 °C) serta mempunyai sifat termal lebih baik. Mula-mula dibuat ingot dari logam U dan Zr dengan kandungan 35%, 45%, dan 55% berat. Ingot yang diperoleh selanjutnya dibuat serbuk dengan teknik hidriding dilanjutkan dengan *milling*. Serbuk U-ZrH<sub>x</sub> yang diperoleh selanjutnya dimasukkan cetakan (*dies*) dan dipress pada tekanan 20 ton/cm<sup>3</sup> sehingga membentuk *green pellet*. *Green pellet* yang diperoleh diuji antara lain: komposisi unsur, dimensi, densitas, dan transisi temperatur. Hasil pengujian komposisi menunjukkan beberapa unsur impuritas yang melebihi batas yang diijinkan diantaranya unsur Ni, Mg, Cd, Zr dan K. Dari pengujian densitas diperoleh nilai densitas yang semakin menurun bila kandungan Zr bertambah. Nilai densitas untuk U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> masing-masing sebesar 9,9141; 7,9920 ; dan 7,0359 g/cm<sup>3</sup>. Sementara itu hasil pengujian DTA menunjukkan semua mengalami perubahan fasa dari fasa semula  $\alpha + \delta 1$  menjadi fasa  $\gamma$  pada akhir reaksi.

**Kata kunci:** *Green pellet*, U-ZrH<sub>x</sub>, PWR.

### ABSTRACT

**MAKING THE U-ZrH<sub>x</sub> GREEN PELLETS FOR PWR FUEL.** The U-ZrH<sub>x</sub> fuel is a replacement PWR UO<sub>2</sub> fuel that has been used. The U-ZrH<sub>x</sub> fuel has been chosen because the fuel hydrogen as a moderator can put directly in the fuel which allows the reactor to operate at relatively high temperatures (up to 750 °C) and it has better thermal properties. Firstly, U-ZrH<sub>x</sub> ingot was made from U and Zr metals contain 35%, 45% and 55% Zr by weight consequently. Next, the ingot was converted into powder using hydriding technique continued with *milling*. The U-ZrH<sub>x</sub> powder then put into the mold (*dies*) and pressed at a pressure of 20 ton/cm<sup>3</sup> to form *green pellets*. *Green pellets* obtained were characterized by elemental composition, dimensions, density, and the transition temperature testing. The results on elemental composition testing showed the some impurity elements that exceed allowable limits include elements Ni, Mg, Cd, Zr and K. The result on density testing showed that the density decreases when the Zr content increases. Density values for the U-35ZrH<sub>x</sub>, the U-45ZrH<sub>x</sub> and the U-55ZrH<sub>x</sub> respectively 9.9141 ; 7.9920; and

7.0359 g/cm<sup>3</sup>. Meanwhile, the results of testing the transition temperature using DTA technique showed that all the green pellets changing their phase from the original phase  $\alpha + \gamma \delta 1$  into phase at the end of the reaction.

**Keywords:** green pellet, U-ZrH<sub>x</sub>, PWR.

## PENDAHULUAN

Penggunaan energi di Indonesia semakin lama semakin bertambah seiring dengan pertumbuhan industri yang membutuhkan pasokan penambahan energi listrik yang cukup besar. Kebutuhan tambahan energi yang cukup besar tersebut harus segera ditaganani dengan cara menambah pasokan listrik dari berbagai sumber. Beberapa jenis sumber energi baik energi terbarukan maupun tidak terbarukan cukup tersedia di Indonesia, seperti energi fosil (minyak), tambang (batu bara), surya, angin, panas bumi dan bahan nuklir. Penggunaan energi fosil maupun hasil tambang (batu bara) yang terus-menerus dan tidak terbarukan semakin lama mengakibatkan berkurangnya sumber fosil (minyak) bahkan akan habis, sedangkan energi surya dan angin masih terbatas penggunaan dalam skala kecil. Oleh karena itu perlu dikembangkan sumber energi baru yang bersih dan efisien misalnya energi nuklir.

Pengembangan bahan bakar nuklir di Indonesia dikembangkan oleh Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)-Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN). Dalam praktek, pengembangan bahan bakar nuklir tersebut dibagi menjadi dua jalur yaitu pengembangan bahan bakar untuk reaktor daya dan reaktor riset. Pengembangan bahan bakar reaktor daya ditujukan antara lain: untuk mendapatkan prototipe elemen bakar PWR dan berkas bahan bakar HWR/Cirene. Sementara itu, pengembangan bahan bakar reaktor riset ditujukan antara lain untuk mendapatkan bahan bakar baru berdensitas tinggi berbasis UN, U-Mo dan U-ZrH<sub>x</sub> yang tertuang di dalam RENSTRA Pusat

Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN tahun 2010 -2014.

Bahan bakar reaktor PWR umumnya terbuat dari bahan bakar oksida keramik yakni UO<sub>2</sub>, metal, dan campuran keramik metal (Cermet)<sup>[1,2,3]</sup>. Desain bahan bakar baru telah diusulkan untuk mengganti bahan bakar UO<sub>2</sub> dengan uranium hidrida (U-ZrH<sub>x</sub>), dimana dalam desain bahan bakar baru tersebut dapat diperoleh keuntungan yaitu dapat ditempatkan hidrogen sebagai moderator secara langsung di dalam bahan bakar yang memungkinkan reaktor dapat beroperasi pada temperatur yang relatif tinggi (hingga 750 °C) serta mempunyai sifat termal lebih baik dibanding bahan bakar keramik<sup>[3]</sup>. Selain itu, penggunaan uranium sebagai bahan bakar uranium hidrida (U-ZrH<sub>x</sub>) relatif rendah dibandingkan dengan bahan bakar jenis lain, seperti bahan bakar keramik. Kelebihan yang dimiliki bahan bakar uranium hidrida ini berdampak langsung terhadap nilai ekonomis. Nilai investasi bahan bakar hidrida relatif lebih rendah dan ekonomis daripada bahan bakar jenis keramik.

Design PWR yang menggunakan bahan bakar U-ZrH<sub>x</sub> diusulkan oleh General Atomic dari USA dan dikenal sebagai reaktor TPS (TRIGA *Power System*), dimana dalam desain tersebut reaktor menghasilkan daya sebesar 64 MWt/16,4 MWe dan menggunakan uranium berpeng-kayaan rendah yakni <sup>235</sup>U sebesar 19,9%<sup>[4]</sup>. Pengembangan bahan bakar uranium zirkonium selain ditujukan untuk mendapatkan bahan bakar PWR juga diarahkan untuk dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi bahan bakar reaktor generasi ke IV.

Pada penelitian ini dilakukan pembuatan paduan U-ZrH<sub>x</sub> dengan mem-variasikan kandungan Zr. Kandungan Zr

yang bervariasi akan mempengaruhi sifat-sifat yang dimiliki diantaranya densitas dan perubahan transisi temperatur dari paduan U-ZrH<sub>x</sub>. Penelitian ini bertujuan untuk menguasai teknologi pembuatan *green pellet* uranium zirkonium hidrida (U-ZrH<sub>x</sub>) yang dapat diproses lanjut menjadi *pellet sintered* dan memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar PWR.

Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar suatu reaktor nuklir, maka bahan bakar harus mempunyai kemurnian yang cukup tinggi dan kandungan unsur yang mempunyai tampang serapan neutron mikroskopik rendah ( $\sigma_a$ ). Adanya unsur pengotor dapat mempengaruhi unjuk kerja bahan bakar bila digunakan di dalam reaktor karena terbentuknya senyawa atau fasa oleh unsur pengotor tersebut. Bahan bakar juga tidak diijinkan mengandung unsur yang mempunyai tampang lintang serapan neutron mikroskopik tinggi dan dalam jumlah yang cukup tinggi pula. Hal ini disebabkan bila unsur yang mempunyai tampang lintang serapan neutron mikroskopik tinggi tersebut dengan jumlah yang cukup tinggi maka dikawatirkan unsur tersebut menyerap neutron cukup tinggi. Hal ini akan mengganggu operasi reaktor yakni reaktor akan terhenti karena neutron semakin lama semakin berkurang dan tidak cukup untuk melangsungkan reaksi berrantai. Unsur yang mempunyai tampang lintang neutron mikroskopik tinggi seperti Cd dan B, masing-masing adalah sebesar 2520.(50.) barn dan 767.(8.) barn<sup>[5,6]</sup>.

Densitas uranium suatu bahan bakar mempunyai peranan yang penting di dalam bahan bakar nuklir itu sendiri karena banyak sedikitnya uranium (U) yang dapat dimasukkan ke dalam bahan bakar maka akan tergantung dari besar kecilnya densitas dari paduan bahan bakar tersebut. Semakin tinggi densitas bahan bakar nuklir semakin banyak pula U yang dapat dimasukkan ke dalam bahan bakar. Densitas logam akan berubah karena penambahan unsur paduan.

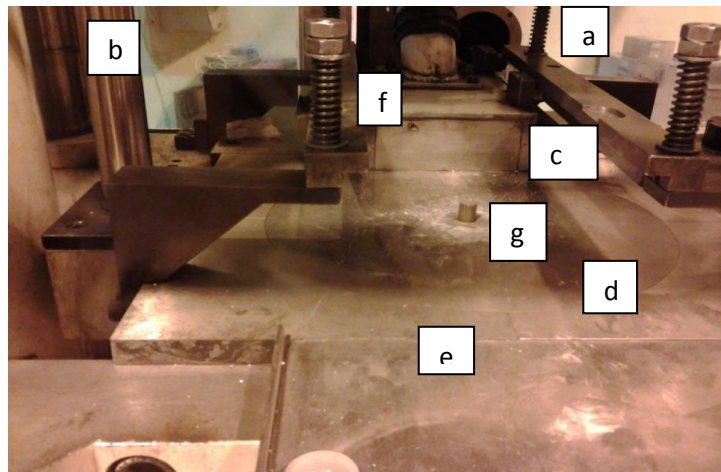
Di dalam paduan massa zat terlarut berbeda dengan massa atom pelarut dan juga karena perubahan parameter kisi<sup>[7]</sup>. Perubahan parameter kisi dapat diturunkan dari hukum Vegard<sup>[7]</sup>, yang mengasumsikan bahwa parameter kisi larutan padat linear dengan konsentrasi atom. Sifat termal suatu bahan bakar nuklir (dalam hal ini transisi perubahan temperatur) juga akan berpengaruh terhadap unjuk kerja dari bahan bakar nuklir tersebut.

## TATA KERJA

Logam U dan Zr dipotong-potong dan masukkan ke dalam tungku peleburan busur listrik untuk selanjutnya dilebur dengan komposisi U-Zr masing-masing adalah sebesar 35%, 45% dan 55% Zr. Hasil peleburan U-Zr berbentuk ingot yang berdiameter 15 mm dan ketebalan 0,5 mm selanjutnya dibuat serbuk melalui cara hidriding. Proses hidriding dimulai dengan memotong ingot U-Zr, potongan U-Zr selanjutnya dimasukkan ke dalam wadah/canting yang terbuat dari bahan gelas selanjutnya dimasukkan ke dalam tabung *retort* pada unit hidriding untuk selanjutnya dilakukan hidriding. Proses hidriding menghasilkan paduan U-ZrH<sub>x</sub> yang rapuh dan mudah dihancurkan dengan cara *dimilling* sehingga menjadi serbuk. Sebagian serbuk dianalisis komposisi, transisi temperatur dan sebagian lainnya dibuat *green pellet*. Untuk membuat *green pellet*, serbuk U-ZrH<sub>x</sub> dimasukkan ke dalam cetakan dengan berat tertentu dan dilakukan pengepresan dengan tekanan *press* mencapai 20 ton/cm<sup>3</sup> sehingga menjadi *pellet* U-ZrH<sub>x</sub>. *Green pellet* U-ZrH<sub>x</sub> yang diperoleh selanjutnya diukur dimensi dan beratnya. Dari dimensi dan berat yang diperoleh selanjutnya dapat diketahui densitasnya. Pengukurann densitas juga dilakukan dengan menggunakan peralatan pikno- meter. Untuk mengukur transisi temperatur *green pellet*, sebagian serbuk U-ZrH<sub>x</sub> yang akan dipress diambil untuk

dilakukan pengujian transisi temperatur menggunakan *Differential Thermal Analysis* (DTA). Gambar 1 menampilkan peralatan mesin *press* untuk membuat *green pellet*,

sedangkan Gambar 2 ditampilkan bentuk dan ukuran *green pellet*.



Keterangan:

a= lengan pengumpan

b= as mesin

c = pengumpan

d= *dies*

e= meja

f = penahan pengumpan agar tidak naik

g= *green pellet* hasil pengepresan

Gambar 1. Peralatan mesin *press* untuk membuat *green pellet* U-ZrH<sub>x</sub>



Gambar 2. Contoh *green pellet* U-ZrH<sub>x</sub>

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam pembahasan ini dibahas antara lain hasil analisis komposisi kimia, pengujian densitas, dan pengujian termal (transisi perubahan temperatur).

### Analisis komposisi kimia

Hasil percobaan analisis kimia serbuk U-ZrH<sub>x</sub> ditampilkan dalam bentuk gambar dan tabel. Tabel 1 yang menampilkan hasil analisis komposisi kimia menggunakan peralatan spektrometer serapan atom

(AAS) untuk mengetahui impuritas yang terdapat di dalam paduan U-ZrH<sub>x</sub> menunjukkan bahwa sebagian unsur yang ada melebihi persyaratan untuk bahan bakar nuklir, seperti unsur Ni, Mg, Cd, Zr dan K. Unsur Ni terdapat pada sampel U-35ZrH<sub>x</sub> dan U-45ZrH<sub>x</sub> dimana keduanya melebihi persyaratan yang diijinkan, masing-masing sebesar 51,8094 ug/g dan 39,3718 ug/g sedangkan persyaratan ≤ 30,0 ug/g. Untuk unsur Mg hanya terdapat pada U-35ZrH<sub>x</sub> yang besarnya adalah 76,3551 ug/g sedangkan persyaratan yang diijinkan ≤ 50,0 ug/g. Unsur lain seperti Cd terdapat pada U-35Zr dan U-45ZrH<sub>x</sub> dimana masing-masing sebesar 0,4508 ug/g dan 0,3667 ug/g sedangkan persyaratan ≤ 0,2 ug/g. Sementara itu, unsur Zr dan K masing-masing terdapat pada U-35ZrH<sub>x</sub> dan U-45ZrH<sub>x</sub> dimana kedua unsur tersebut tidak diinginkan keberadaannya. Keberadaan unsur-unsur pengotor yang melebihi dari persyaratan tersebut diduga berasal dari material peralatan yang digunakan selama proses baik dari proses pemotongan, peleburan sampai penghancuran menjadi serbuk. Dari ketiga sampel uji, hanya

sampel uji U-55ZrH<sub>x</sub> yang relatif kecil kandungan unsur pengotornya (hanya unsur Cd). Dari unsur pengotor yang ada, keberadaan unsur Cd yang perlu diperhatikan karena mempunyai tampang lintang mikroskopik tinggi dibandingkan unsur-unsur lainnya. Tampang lintang serapan neutron mikroskopik Cd adalah 2520.(50.) barn dan 767.(8.) barn<sup>[5,6]</sup>. Dengan tampang lintang mikroskopik yang cukup tinggi maka akan menyerap neutron dalam jumlah yang cukup besar, dimana hal ini akan menyebabkan operasi reaktor terganggu. Pada analisis kandungan U di dalam serbuk U-ZrH<sub>x</sub> diperoleh hasil seperti

tertera dalam Tabel 2. Hasil analisis yang tertera di dalam Tabel 2 memperlihatkan kandungan U pada masing-masing serbuk U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub> dan U-55ZrH<sub>x</sub> berturut-turut sebesar 62,9100; 54,5645; dan 44,1308 % berat. Perbedaannya relatif kecil bila dibandingkan dengan kandungan U seperti yang direncanakan yakni untuk U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> masing-masing sebesar 3,0770 ; 0,7918; dan 1,9310 %. Memperhatikan hasil analisis kandungan U tersebut dapat dikatakan bahwa hasil analisis kandungan U mendekati hasil yang direncanakan.

Tabel 1. Hasil analisis komposisi kimia pengotor di dalam serbuk U-ZrH<sub>x</sub>.

No	Unsur	Sampel U-35 ZrH <sub>x</sub>	Sampel U-45 ZrH <sub>x</sub>	Sampel U-55ZrH <sub>x</sub>	Persyaratan untuk BB PWR
1	Al	0,0350 %	0,0129 ug/g	0,3463 ug/g	≤ 50,0 ug/g
2	Ni	51,8094 ug/g	39,3718 ug/g	0,1100 ug/g	≤ 30,0 ug/g
3	Fe	7,6974 ug/g	7,8643 ug/g	0,326 ug/g	≤ 100,0 ug/g
4	Co	0,6616 ug/g	0,7288 ug/g	ttd	≤ 75,0 ug/g
5	Mn	2,5973 ug/g	2,3093 ug/g	0,0049 ug/g	≤ 10,0 ug/g
6	Pb	0,1597 ug/g	0,1652 ug/g	ttd	≤ 60,0 ug/g
7	Mg	76,3551 ug/g	10,5672 ug/g	0,0379 ug/g	≤ 50,0 ug/g
8	Cu	14,3724 ug/g	10,0067 ug/g	0,0600 ug/g	≤ 20,0 ug/g
9	Cr	35,5799 ug/g	33,7893 ug/g	0,0797 ug/g	≤ 100,0 ug/g
10	Zn	-	-	0,4309 ug/g	≤ 100,0 ug/g
11	Cd	0,4508 ug/g	0,3667 ug/g	0,556 ug/g	≤ 0,2 ug/g
12	Mo	-	-	0,0294 ug/g	≤ 50,0 ug/g
13	Si	0,0858 ug/g	0,0082 ug/g	- ug/g	≤ 60,0 ug/g
14	V	-	-	-	≤ 5,0 ug/g
15	Ca	0,0301 ug/g	0,0269 ug/g	1,9281 ug/g	≤ 50,0 ug/g
16	Sn	- ug/g	- ug/g	0,0294 ug/g	≤ 50,0 ug/g
17	B	- ug/g	- ug/g	- ug/g	≤ 0,3 ug/g
18	Zr	180,3569 ug/g	30,36929 ug/g	- ug/g	- ug/g
19	K	5,8453 ug/g	3,4075 ug/g	- ug/g	- ug/g

Tabel 2. Hasil analisis kandungan U di dalam serbuk paduan U-ZrH<sub>x</sub>

No.	Hasil Analisis		
	U-35 ZrH <sub>x</sub> (%berat)	U-45ZrH <sub>x</sub> (%berat)	U-55ZrH <sub>x</sub> (%berat)
1	62,6412	51,6780	43,8396
2	62,4615	55,0687	44,6955
3	62,7359	55,4840	45,9063
4	63,4644	55,5806	43,1298
5	63,2468	55,0107	43,0828
Rerata	62,9100	54,5645	44,1308
Direncanakan	65,0000	55,0000	45,0000
Selisih dengan yang	3,0770	0,7918	1,9310

### Densitas

Pada pengukuran dimensi *green pellet* secara manual diperoleh dimensi seperti tertera di dalam Tabel 3. Tabel 3 memperlihatkan hasil berupa tinggi (T), diameter (D), berat (W) *green pellet* dan densitas hasil perhitungan. Perhitungan densitas berdasarkan ukuran dimensi *green pellet*, dan dari perhitungan diperoleh nilai densitas untuk masing-masing *green pellet* U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> adalah 6,70525; 5,5675; dan 4,8420 g/cm<sup>3</sup>. Pada pengukuran densitas dengan menggunakan peralatan piknometer diperoleh nilai densitas seperti tertera pada Tabel 4, dimana nilai densitas untuk U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> masing-masing sebesar 9,9141; 7,9920 ; dan 7,0359 g/cm<sup>3</sup>. Sementara itu, nilai densitas secara teoritis untuk U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> adalah sebesar 14,61; 13,4; dan 12,163 g/cm<sup>3</sup>. Pengukuran densitas baik melalui pengukuran manual dengan mengukur dimensi dan berat maupun dengan menggunakan peralatan piknometer terlihat bahwa nilai densitas U-ZrH<sub>x</sub> semakin rendah apabila kandungan Zr semakin

tinggi. Hal ini disebabkan oleh densitas Zr lebih rendah dibandingkan densitas U sehingga apabila kandungan Zr semakin besar maka densitas paduan U-ZrH<sub>x</sub> yang terjadi semakin rendah. Densitas logam U dan Zr masing-masing adalah sebesar 19,000 g/cm<sup>3</sup> dan 6,511 g/cm<sup>3</sup>[8]. Perbedaan nilai densitas yang diperoleh dari hasil pengukuran dimensi *green pellet* dengan pengukuran menggunakan peralatan piknometer ini disebabkan karena ketepatan /presisi dari cara manual yang kurang sehingga menghasilkan ukuran /dimensi ketinggian dan diameter *green pellet* yang kurang tepat sehingga pada perhitungan densitas maka menghasilkan nilai densitas yang kurang tepat pula. Berbeda hasil yang diperoleh dari pengukuran dengan menggunakan peralatan piknometer dimana dalam pengukurannya peralatan tersebut menggunakan gas helium (He). Dengan menggunakan He yang dapat masuk ke dalam pori-pori *green pellet* maka diperoleh hasil densitas yang lebih akurat. Bahan bakar ini diharapkan mempunyai densitas yang setinggi-tingginya mendekati nilai densitas teoritisnya.

Tabel 3. Hasil pengukuran dimensi dan perhitungan densitas *green pellet*

Item	P (MP)	T ( mm)	D ( mm)	W (g)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) rata-rata
U-35ZrH <sub>x</sub>	4,0	13,68	11,18	9,2602	6,8989	6,7052
	4,0	11,75	11,20	7,5341	6,5116	
U-45ZrH <sub>x</sub>	4,5	14,76	11,23	8,2543	5,6489	5,5675
	4,0	9,05	11,19	4,8802	5,4860	
U-55ZrH <sub>x</sub>	4,0	12,27	11,20	5,8503	4,8420	4,8420

Keterangan:

P = Tekanan *press* (MP), T = ketinggian *green pellet*, D = diameter *green pellet*

Tabel 4. Hasil uji densitas *green pellet* U-ZrH<sub>x</sub>

No	Item	Hasil pengukuran dengan Piknometer	Perhitungan (teoritis)
		$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	U-35ZrH <sub>x</sub>	9,9141	14,61
2	U-45ZrH <sub>x</sub>	7,9920	13,40
3	U-45ZrH <sub>x</sub>	7,0359	12,16

### Transisi perubahan temperatur

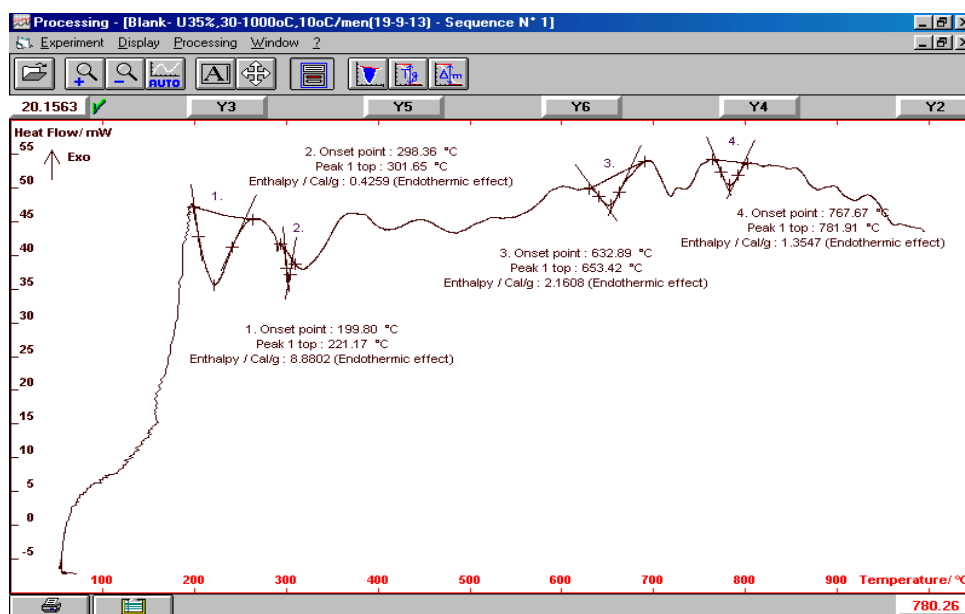
Hasil pengujian transisi perubahan temperatur dengan menggunakan peralatan *Differential Thermal Analysis* (DTA) ditampilkan pada Gambar 3.a, b dan c serta Tabel 5 yang merupakan termogram *green pellet* U-ZrH<sub>x</sub>. DTA dengan variasi kandungan Zr sebesar 35, 45 dan 55%. Gambar 2.a, b, dan c memperlihatkan pembentukan puncak-puncak endotermik. Hasil pengukuran berupa besaran entalpi, temperatur lebur dan pembentukan senyawa dengan adanya perubahan aliran panas. *Green pellet* U-35ZrH<sub>x</sub> mengalami reaksi kimia sebanyak empat tahapan yaitu terjadi reaksi endotermik pada temperatur 199,80-221,17 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 8,8802 kal/g, tahap kedua terjadi reaksi endotermik pada temperatur 298,36-301,65 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 0,4259 kal/g. Kedua tahapan reaksi diatas mempunyai fasa  $\alpha+\delta 1$ . Tahapan ketiga terjadi reaksi endotermik pada temperature 632,89-653,42 °C terjadi perubahan fasa dari  $\alpha+\delta 1$  menjadi  $\alpha+\gamma_{Zr}$  dengan membutuhkan panas

sebesar 2,1608 kal/g, dan tahapan keempat terjadi reaksi endotermik pada temperatur 767,67 °C -781,91 °C terjadi perubahan fasa sebanyak tiga kali yaitu dari  $\alpha+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\beta+\gamma_{Zr}$ , dari  $\beta+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma+\gamma_{Zr}$ , selanjutnya dari  $\gamma+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma$  dengan membutuhkan panas sebesar 1,3547 kal/g. Pada paduan U-45ZrH<sub>x</sub>, reaksi berlangsung dalam lima tahapan yaitu tahapan pertama terjadi reaksi endotermik pada temperatur 195,60-215,60 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 5,5411 kal/g, tahapan kedua terjadi reaksi endotermik pada temperatur 527,40 °C - 545,14 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 0,5864 kal/g. Kedua tahapan reaksi diatas mempunyai fasa  $\alpha+\delta 1$ . Tahapan ketiga terjadi reaksi endotermik pada temperatur 586,90-610,07 °C terjadi perubahan fasa  $\alpha+\delta 1$  menjadi  $\alpha+\gamma_{Zr}$  dengan membutuhkan panas sebesar 1,5277 kal/g, tahapan keempat terjadi reaksi endotermik pada temperatur 710,48 °C - 719,61 °C terjadi perubahan fasa tiga kali dari  $\alpha+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\beta+\gamma_{Zr}$ , dari  $\beta+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma+\gamma_{Zr}$ , dan dari  $\gamma+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma$  dengan mem-

butuhkan panas sebesar 0,3273 kal/g. Tahapan kelima terjadi reaksi endotermik pada temperatur 747,67 -755,4 tidak terjadi perubahan fasa tetap berfasa  $\gamma$  membutuhkan panas sebesar 0,2967 kal/g. Pada tahapan kelima panas reaksi digunakan untuk menaikkan temperatur. Sementara itu, paduan U-55ZrH<sub>x</sub> mengalami reaksi sebanyak empat tahapan yaitu tahapan pertama terjadi reaksi endotermik yang berlangsung pada temperatur 191,96 °C - 210,36 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 16,6969 kal/g, tahapan kedua terjadi reaksi endotermik pada temperatur 290,25 °C - 295,87 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan membutuhkan panas sebesar 0,2098 kal/g. Tidak terjadinya perubahan fasa dalam proses diatas disebabkan panas yang terjadi pada kedua reaksi diatas digunakan untuk menaikkan temperatur reaksi. Tahapan ketiga terjadi reaksi eksotermik pada temperatur 324,59 °C - 327,02 °C tidak terjadi perubahan fasa dengan mengeluarkan panas sebesar - 0,3407 kal/g, dan tahapan keempat terjadi reaksi endotermik pada temperatur 742,24

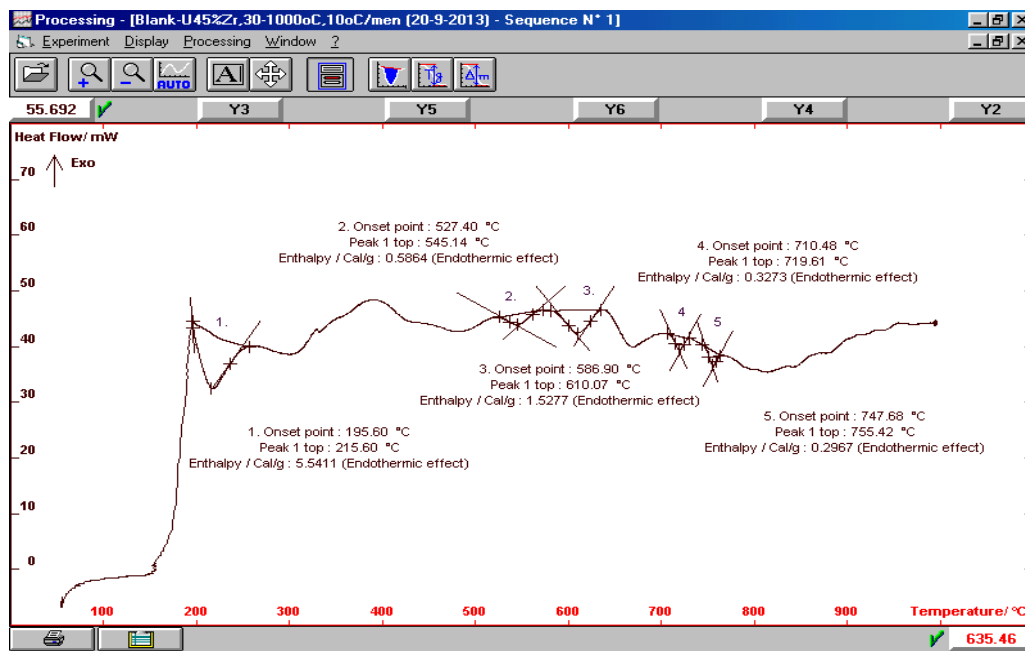
°C -788,04 °C terjadi perubahan fasa sebanyak empat kali yaitu dari fasa  $\alpha+\delta 1$  menjadi  $\alpha+\gamma_{Zr}$ ,  $\alpha+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\beta+\gamma_{Zr}$ , dari  $\beta+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma+\gamma_{Zr}$ , dan dari  $\gamma+\gamma_{Zr}$  menjadi  $\gamma$  dengan membutuhkan panas sebesar 8,5834 kal/g.

Memperhatikan reaksi kimia dan kaitannya dengan perubahan fasa terlihat bahwa secara keseluruhan reaksi pada tiap-tiap paduan U-ZrH<sub>x</sub> membutuhkan panas yang berbeda-beda<sup>[9]</sup>. Dengan memperhatikan diagram fasa U-ZrH<sub>x</sub><sup>[10]</sup>, panas yang dibutuhkan serta perubahan fasa yang terjadi maka dari ketiga paduan tersebut pada paduan U-45ZrH<sub>x</sub> membutuhkan panas yang paling rendah untuk bertransformasi dari fasa  $\alpha +\delta 1$  hingga menjadi fasa  $\gamma$ . Ketiga paduan tersebut yaitu U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> membutuhkan panas masing-masing sebanyak 12,8216 kal/g; 8,2792 kal/g; dan 25,1494 kal/g. Dapat dikatakan bahwa apabila digunakan sebagai bahan bakar ditinjau dari sifat termalnya (transformasi perubahan panas) maka paduan U-45ZrH<sub>x</sub> dapat menjadi pilihan yang paling baik.

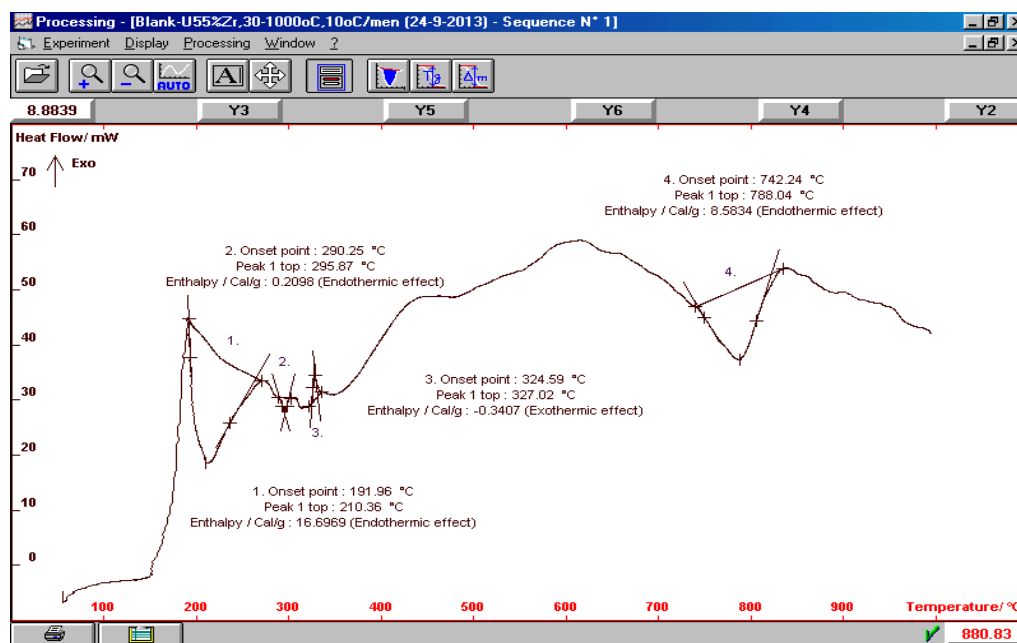


a.





b.



c.

Gambar 3. Kurva hasil pengujian transisi perubahan temperatur dengan DTA.  
U-35ZrH<sub>x</sub>; b. U-45ZrH<sub>x</sub>, dan c. U-55ZrH<sub>x</sub>

## SIMPULAN

Dari percobaan pembuatan *green pellet* U-35ZrH<sub>x</sub>, U-45ZrH<sub>x</sub>, dan U-55ZrH<sub>x</sub> dapat disimpulkan bahwa hasil uji komposisi kimia terhadap semua sampel

*green pellet* diperoleh untuk U-35ZrH<sub>x</sub> dan U-45ZrH<sub>x</sub> mengandung beberapa unsur impuritas yang melebihi batas yang diijinkan diantaranya unsur Ni, Mg, Cd, Zr dan K, sedangkan untuk *green pellet* U-55ZrH<sub>x</sub> hanya unsur Cd yang melebihi batas.

Dilihat dari densitasnya, semua *green pellet* yang diuji mempunyai nilai densitas yang lebih rendah dari densitas teoritisnya baik dari pengukuran manual maupun menggunakan piknometer. Hasil pengujian transisi temperatur dengan menggunakan DTA diperoleh bahwa *green pellet* U-35ZrH<sub>x</sub> dan U-55ZrH<sub>x</sub> mengalami empat kali tahapan reaksi endotermik sedangkan untuk U-45ZrH<sub>x</sub> mengalami lima kali tahapan reaksi endotermik. Selama terjadi reaksi endotermik semua *green pellet* mengalami perubahan fasa dari fasa semula  $\alpha + \delta$  menjadi fasa  $\gamma$  pada akhir reaksi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. G. Bozzolo, G.L. Hofman, A.M. Yacout, H.O. Mosca, (2012). *Lanthanides Migration And Immobilization In U-Zr Nuclear Fuels*, Journal of Nuclear Materials, 425 (2012): 188–192.
- [2]. John Thomas Creasy (2011). *Thermal Properties Of Uranium Molybdenum Alloys: Phase Decomposition Effects Of Heat Treatments*. A Thesis Master of Science, Major Subject: Nuclear Engineering, Texas A&M University, pages 1-3.
- [3]. Nicholas, R. Browne, Arnold Aronson, Michael Todosowa, Ryan Britoa, B, Kenneth J. McClellan, (2014). *Neutronic Performance Of Uranium Nitride Composite Fuels In a PWR*. Journal of Nuclear Engineering and Design, Volume 275, 393–407.
- [4]. P. K. Bhowmik, S. K. Dhar, and S. Chakraborty, (2013). *Operation and Control of TRIGA Nuclear Research*, International Journal of Information and Electronics Engineering, Vol. 3, No. 6, 553.
- [5]. Masrukan K, Aslina Br.Ginting (2005), Analisis Komposisi Bahan Dan Sifat Termal Paduan AIMgsi-1 Tanpa Boron Hasil Sintesis Untuk Kelongsong Elemen Bakar Reaktor Riset, Jurnal Tek. Bahan Nukl.Vol. 1 No. 2: 58–107. ISSN: 1907-2635.
- [6]. Anis Rohanda, Ardani, (2012). Penentuan Intensitas Sumber Gamma Di Teras Reaktor Riset Berbahan Bakar Uranium Molibdenum, Jurnal Sigma Epsilon, Volume 16 No 3. ISSN No. 0853 9103.
- [7]. E. Sidot, A. Khan-Harari, E.Cesari, (2005). *The Lattice Parameter Of A-Bronzes As A Function Of Solute Content: Application To Archaeological*. Journal Material Science and Engineering, Volume 393, Issues 1–2, 25, 147–156.
- [8]. Masrukan K, Tri Yulianto, dan Sungkono, (2010). Pengaruh Unsur Nb Pada Bahan Bakar Paduan U-Zr-Nb Terhadap Densitas, Kekerasan Dan Mikrostruktur, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania, Vol. 16 No. 3, 105 – 144. ISSN No.0852-4777.
- [9]. A. Savchenko, I. Konovalov, A. Vatulin, A. Morozov, V. Orlov, O. Uferov, (2007). *Dispersion Type Zirconium Matrix Fuels Fabricated By Capillary Impregnation Method*, Journal of Nuclear Materials 362 : 356–363.
- [10]. Ivanov, Badaeva (1983). *Phase Diagrams of Uranium Alloys*. Amerind Publishing Co. PVT. LTD, New Delhi, Halaman 54.

## LAMPIRAN

Tabel 1. Hasil pengujian transisi temperatur menggunakan DTA.

No	Nama sampel	Temperatur reaksi	Entalpi (Kal/g)	Keterangan
1	U-35ZrH <sub>x</sub>	199,80-221,17	8,8802	Reaksi endotermik
		298,36-301,65	0,4259	Reaksi endotermik
		632,89-653,42	2,1608	Reaksi endotermik
		767,67-781,91	1,3547	Reaksi endotermik
2	U-45ZrH <sub>x</sub>	195,60-215,60	5,5411	Reaksi endotermik
		527,40-545,14	0,5864	Reaksi endotermik
		586,90-610,07	1,52777	Reaksi endotermik
		710,48-719,61	0,3273	Reaksi endotermik
		747,67- 755,4	0,2967	Reaksi endotermik
3	U-55ZrH <sub>x</sub>	191,96-210,36	16,6969	Reaksi endotermik
		290,25-295,87	0,2098	Reaksi endotermik
		324,59-327,02	-0,3407	Reaksi endotermik
		742,24-788,04	8,5834	Reaksi endotermik