

## PROSES SIKLUS REDUKSI ( $U_3O_8$ + 18 HASIL FISI) UNTUK BAHAN BAKAR DUPIC

**Sigit\*, Ghaib Widodo\*, Moch. Setyadji\*\*, Damunir\*\*, Triyono\*\***

\*Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN) – BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15310

\*\* Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan (PTAPAB) – BATAN

Jl. Babarsari PO BOX 6000, Yogyakarta

e-mail: sigit@batan.go.id

(Naskah diterima: 8 November 2012, disetujui: 27 Desember 2012)

### ABSTRAK

**PROSES SIKLUS REDUKSI ( $U_3O_8$  + 18 HASIL FISI) UNTUK BAHAN BAKAR DUPIC.** Telah dilakukan proses reduksi ke-1 bahan bakar nuklir yaitu ( $U_3O_8$  + 18 hasil fisi) di dalam tungku reduksi yang dialiri gas hidrogen pada temperatur yang bervariasi dari 600 – 900 °C selama 3 jam. Hasil reduksi berupa serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) yang kemudian ditentukan densitas curah, ketuk dan sejati serta rasio O/U dan dipelajari pula efek penggerusan serbuk. Serbuk yang tidak mengalami penggerusan, mempunyai densitas yang lebih kecil dibandingkan dengan serbuk yang mengalami penggerusan sehingga penentuan densitas dilakukan melalui tahap penggerusan terlebih dahulu. Besarnya temperatur di atas mempengaruhi densitas yang diperoleh, semakin tinggi temperatur, semakin tinggi pula densitas serbuk, sedangkan rasio O/U mendekati 2. Setelah diperoleh serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) dari hasil reduksi ke-1, maka serbuk tersebut dioksidasi pada temperatur 500 °C selama 2 jam hingga diperoleh lagi serbuk ( $U_3O_8$  + 18 hasil fisi) yang merupakan bahan untuk proses reduksi ke-2. Proses reduksi ke-2 dilakukan sebagaimana proses reduksi ke-1, demikian diulangi sampai pengulangan (siklus) ke-4. Hasil proses reduksi berupa serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) yang dikarakterisasi densitas dan rasio O/U. Proses pengulangan reduksi tersebut memperbesar densitas serbuk dan rasio O/U. Dari percobaan yang dilakukan diperoleh hasil kondisi proses yang relatif baik yaitu pada siklus yang ke-3, dan temperatur proses reduksi 800 °C dengan waktu pemanasan selama 3 jam. Pada kondisi tersebut diperoleh densitas curah, ketuk dan sejati masing-masing 2,4594; 3,2096 dan 10,2866 g/cm<sup>3</sup> (93,77% TD) serta rasio O/U sebesar 2,0192.

**Kata kunci:** Siklus reduksi,  $UO_2$ ,  $U_3O_8$ , hasil fisi, bahan bakar DUPIC.

### ABSTRACT

**REDUCTION CYCLE PROCESS OF ( $UO_2$  + 18 FISSION PRODUCTS) FOR DUPIC FUEL.** First reduction process of nuclear fuel ( $U_3O_8$ +18 fission products) has been done in a reduction furnace flowed with hydrogen gas at varying temperatures from 600 – 900 °C for 3 hours. The reduction product was  $UO_2$  + 18 fission products, of which bulk, tap and true density, O/U ratio, and effect of powder crushing were to be determined. Powder that was not crushed has smaller densities than

that under going crushing, so that the determination of densities was conducted through crushing stage. It is indicated that the temperature affects the obtained densities, the higher the temperature the higher the densities of the powder with O/U ratio approaching to 2. After obtaining powder of ( $UO_2 + 18$  fission) from the first reduction process, the powder was oxidized at a temperature of 500 °C for 2 hours until the powder ( $U_3O_8 + 18$  fission) were obtained again and to be used for the second reduction process. The second reduction process was carried out in a way similar to the first reduction process and was repeated up to four cycles. The product of the four-cycle reduction process was in the form of ( $UO_2 + 18$  fission products) powder, of which characterization was done for its densities and O/U ratio. The reduction process repetition appears to have enhanced the powder densities and resulted in better O/U ratio. The experiment shows that the relatively good process condition is the third reduction, where the reduction temperature is 800 °C with heating time for 3 hours. In that condition, the bulk, tap and true density obtained are 2,4594; 3,2096 and 10,2866 g/cm<sup>3</sup> (93,77% TD) respectively and the O/U ratio is 2,0192.

**Key words:** Reduction cycle,  $UO_2$ ,  $U_3O_8$ , fission products, DUPIC fuel.

## PENDAHULUAN

Bahan bakar reaktor nuklir yang digunakan saat ini adalah uranium. Untuk reaktor jenis PWR, digunakan uranium diperkaya U-235 sampai sekitar 4%. Di dalam reaktor, uranium diiradiasi dengan neutron sehingga terjadi reaksi pembelahan inti secara berantai yang terkontrol dan menghasilkan energi. Reaksi pembelahan tersebut menghasilkan beberapa unsur berat antara lain Pu, Am, Cm dan sisa uranium dll di dalam bahan bakar bekasnya. Karena masih mengandung bahan bakar yang sangat berharga yaitu uranium dan plutonium maka perlu untuk diperoleh kembali (*recovery*). Untuk mendapatkan kembali bahan bakar tersebut dapat dilakukan dengan proses basah atau olah ulang (*reprocessing*) dan proses kering atau daur ulang (*recycling*). Pada proses basah, telah digunakan metoda PUREX (*plutonium uranium recovery by extraction*) yang didasarkan pada ekstraksi cair-cair menggunakan solven Tri Butil Pospat (TBP) dalam pelarut kerosen. Metoda ini sudah lama ditemukan dan digunakan sampai saat ini<sup>[1]</sup>. Untuk proses daur ulang cara kering, dapat dilakukan dengan berbagai metoda seperti proses garam leleh (pirokimia, teknik

fluidisasi, proses oksidasi/reduksi, *electrorefining* dan metalurgi)<sup>[2,3]</sup>.

Proses daur ulang (*recycling*) bertujuan untuk memanfaatkan kembali bahan bakar uranium dan plutonium yang diperoleh dari pengolahan bahan bakar bekas yang ditambahkan ke bahan bakar segar untuk dibuat bahan bakar baru.

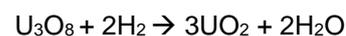
Salah satu proses kering yang diaplikasikan adalah proses oksidasi-reduksi (OREOX/ *Oxidation Reduction of Enriched Oxide Fuel*). Sejak tahun 1991, Kanada, Korea dan Amerika Serikat, telah merealisasikan pemanfaatan kembali bahan bakar bekas reaktor jenis PWR untuk bahan bakar reaktor CANDU atau disebut dengan bahan bakar DUPIC (*Direct Use of PWR fuel In Candu reactor*). Dengan teknologi bahan bakar DUPIC tersebut, dapat dilakukan refabrikasi bahan bakar CANDU dari bahan bakar bekas PWR<sup>[4]</sup>. Teknologi pembuatan bahan bakar DUPIC ini direkomendasikan sebagai teknologi daur ulang bahan bakar yang bersifat *proliferation resistance* yaitu tidak bertentangan dengan perjanjian non-proliferasi (*Non Proliferation Treaty/NPT*). Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) telah mempelajari mengenai bahan bakar DUPIC dalam skala laboratorium<sup>[5]</sup>.

Teknologi bahan bakar DUPIC ini mempunyai keunggulan yaitu: tidak ada material yang terpisah selama proses fabrikasi; uranium, plutonium, hasil fisi dan aktinida minor tetap berada dalam serbuk bahan bakar dan akan digunakan kembali untuk bahan bakar DUPIC, serta pengoperasiannya sederhana dengan menggunakan bahan dalam bentuk padatan, tidak seperti pada proses PUREX<sup>[6,7]</sup>. Untuk pembuatan bahan bakar DUPIC dari bahan bakar bekas PWR bermacam-macam alat digunakan di antaranya mesin *decladding* untuk memisahkan kelongsong dan bahan bakar, tungku OREOX untuk proses oksidasi-reduksi, sistem pengolah *off-gas*, mesin penggerus dan pencampur serbuk, alat kompaksi (*press*), tungku sinter, las laser dll<sup>[7]</sup>.

Penelitian dan pengembangan terus dilanjutkan dengan menggunakan fasilitas *hot cell* dan dengan teknik *remote control*, guna memperbaiki unjuk kerja bahan bakar DUPIC dan telah diimplementasikan untuk konsep bahan bakar bekas di masa mendatang<sup>[8]</sup>. Peneliti dari Korea KIM, J.H. dkk.<sup>[9]</sup>, dan LEE, J.W. dkk.<sup>[10]</sup> melakukan optimasi pembuatan pelet untuk bahan bakar DUPIC dengan menambahkan 14 jenis hasil fisi dalam bentuk oksida ke serbuk  $UO_2$  sebagai SIMFUEL (hasil fisi simulasi) dengan *burn up* 35.000 MWD/MTU. Campuran serbuk tersebut kemudian dibuat menjadi pelet dan disinter hingga menjadi pelet sinter, lalu dikenai proses OREOX dan dikarakterisasi.

Di Indonesia, dalam mendukung kebijakan Pemerintah sektor energi nuklir, juga telah dilakukan penelitian dan pengembangan teknologi daur ulang bahan bakar nuklir dengan metoda oksidasi-reduksi menggunakan bahan bakar  $UO_2$  dan campuran serbuk  $UO_2$  dan  $ZrO_2$  sebagai salah satu hasil fisi (simulasi) dalam bahan bakar bekas. Masing-masing bahan tersebut dikompaksi lalu disinter hingga menjadi pelet

sinter. Pelet ( $UO_2 + ZrO_2$ ) sinter ini kemudian dikenai proses oksidasi hingga menjadi serbuk  $U_3O_8$  lalu direduksi kembali menjadi  $UO_2$ <sup>[11-13]</sup>. Dari penelitian yang dilakukan diperoleh informasi dan pemahaman mengenai teknologi daur ulang dengan proses oksidasi-reduksi. Setelah diperoleh teknologi tersebut, maka dari penggunaan  $ZrO_2$  tersebut kemudian dikembangkan dengan menambah hasil fisi menjadi 18 jenis hasil fisi simulasi sesuai dengan yang didapat dari program Origen-2 seperti pada Tabel 1. Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) yang merupakan serbuk hasil re-oksidasi pelet ( $UO_2 +$  hasil fisi) dari penelitian sebelumnya<sup>[14]</sup>. Untuk dapat digunakan sebagai bahan bakar DUPIC, serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) tersebut direduksi pada temperatur dan waktu tertentu agar diperoleh serbuk ( $UO_2 +$  hasil fisi) *sinterable* (dapat sinter), yang pada proses selanjutnya serbuk hasil reduksi dikompaksi, disinter hingga menjadi pelet bahan bakar baru yang digunakan pada reaktor CANDU/PHWR. Pada penelitian ini dipelajari pengaruh penggerusan serbuk terhadap densitas, pengaruh temperatur serta pengaruh pengulangan proses reduksi terhadap densitas dan rasio O/U. Densitas yang diukur adalah densitas curah (*bulk density*), densitas ketuk (*tap density*) dan densitas sejati (*true density*). Pada proses reduksi, terjadi reaksi antara  $U_3O_8$  dengan gas hidrogen dan  $UO_2$  hasil reduksi ini digunakan sebagai bahan bakar DUPIC. Reaksinya adalah sbb.:



Dari hasil penelitian ini diharapkan diperoleh teknologi pengolahan bahan bakar bekas PWR secara oksidasi-reduksi menjadi bahan bakar DUPIC untuk kemudian digunakan pada reaktor CANDU/PHWR, dan rencana lebih lanjut untuk produksi yang lebih besar.

Tabel 1. Komposisi bahan bakar bekas simulasi, UO<sub>2</sub> pengkayaan U-235 4%, *burn up* 40.000 MWD/MTU, waktu pendinginan 5 tahun

No	Unsur	Bentuk Oksida	Konsentrasi, %
1.	Sr	SrO	0,1100
2.	Y	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0649
3.	Zr	ZrO <sub>2</sub>	0,4967
4.	Mo	MoO <sub>2</sub>	0,4171
5.	Ru	RuO <sub>2</sub>	0,2123
6.	Rh	Rh <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0426
7.	Pd	PdO	0,0681
8.	Te	TeO <sub>2</sub>	0,0426
9.	Ba	BaO	0,1567
10.	La	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1335
11.	Ce	CeO <sub>2</sub>	0,2754
12.	Pr	Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	0,0168
13.	Nd	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,4474
14.	Sm	Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0769
15.	Cd	CdO	0,0026
16.	Eu	Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0119
17.	Gd	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,0028
18.	Sb	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,1034
19.	U	UO <sub>2</sub>	97,3129

Catatan :No 1-18 : unsur hasil fisi dari Origen-2

## TATA KERJA

Bahan yang digunakan adalah serbuk (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> + 18 hasil fisi) yang merupakan serbuk hasil oksidasi pelet (UO<sub>2</sub> + hasil fisi) sinter yang diperoleh pada penelitian sebelumnya<sup>[14]</sup>. Bahan lain yang digunakan adalah CCl<sub>4</sub> untuk penentuan densitas menggunakan piknometer dan timbangan analitik. Serbuk (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> + 18 hasil fisi) ditimbang pada berat tertentu, kemudian dimasukkan dalam krusibel dari bahan keramik dan diletakkan dalam tungku reduksi *La Physique Applique*.

Setelah tungku reduksi ditutup, *power* dihidupkan (dipanaskan) dan divakumkan hingga tekanan 10<sup>-3</sup> bar. Setelah vakum, pemanasan dilanjutkan sampai temperatur 650 °C sambil dialiri gas nitrogen untuk mengusir udara yang ada di dalam tungku reduksi. Setelah itu gas hidrogen dialirkan dengan tekanan 50 mmHg, pemanasan dilanjutkan sampai temperatur proses reduksi yang divariasi 600, 700, 800 dan 900 °C selama 3 jam

hingga H<sub>2</sub> bereaksi dengan U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> dan membentuk serbuk (UO<sub>2</sub> + 18 hasil fisi) sebagai hasil reduksi siklus ke-1 yang kemudian ditentukan densitas serta rasio O/U.

Sebelum mempelajari pengaruh temperatur pada proses reduksi, terlebih dahulu dilakukan percobaan pengaruh penggerusan serbuk guna menaikkan densitas yaitu densitas curah (*pour density*) dan densitas ketuk (*tap density*). Temperatur reduksi yang digunakan adalah 800 °C dan waktu 3 jam.

Pengukuran densitas curah dilakukan dengan cara menimbang sejumlah tertentu serbuk (UO<sub>2</sub> + 18 hasil fisi) kemudian dimasukkan ke dalam gelas ukur dan ditentukan volumenya. Gelas ukur berisi serbuk tersebut diketuk dengan cara dijatuhkan dari ketinggian 10 cm sebanyak 7 kali kemudian diamati volumenya. Untuk penentuan densitas sejati dilakukan dengan menggunakan piknometer dan CCl<sub>4</sub>.

Densitas ditentukan dengan membagi berat dengan volume.

Penentuan rasio O/U dilakukan dengan cara gravimetri yaitu dengan menimbang serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi), dimasukkan ke dalam cawan, lalu dipanaskan dalam tungku kalsinasi pada temperatur 900 °C selama 4 jam sesuai dengan *Analytical Procedures, NDA Methods and Seals Used at Model Facility, Session 31*. Berat serbuk awal (a) dan akhir (b) ditimbang dan dikoreksi dulu dengan mengurangi berat hasil fisi. Rumus yang digunakan:

$$\text{Rasio O/U} = \frac{(a - 0,848 b) / 16}{0,848 b / 238}$$

Serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) hasil proses reduksi siklus ke-1 kemudian dioksidasi pada temperatur 500 °C selama 2 jam hingga menjadi serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi)

dan serbuk ini kemudian direduksi kembali dengan  $H_2$  pada temperatur 800 °C selama 3 jam sebagai proses reduksi siklus ke-2. Percobaan tersebut diulangi untuk siklus reduksi ke-3 dan ke-4. Ditentukan densitas dan rasio O/U serbuk hasil proses reduksi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Efek penggerusan

Serbuk hasil reduksi masih memiliki ukuran yang relatif besar dan bervariasi. Oleh karena itu dilakukan proses penggerusan agar diperoleh serbuk yang homogen dan berdensitas lebih tinggi, mengingat densitas merupakan salah satu karakteristik penting untuk bahan bakar, selain O/U. Diharapkan densitas yang diperoleh mendekati TD (*theoretical density*). Pada Tabel 2 dapat dilihat efek dari penggerusan terhadap densitas serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) hasil reduksi ke-1.

Tabel 2. Efek penggerusan serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) hasil reduksi ke-1 pada temperatur 800 °C selama 3 jam.

Kode sampel	Densitas serbuk ( $UO_2 + 18$ hasil fisi), g/cm <sup>3</sup>					
	Sebelum digerus		Sesudah digerus		Kenaikan, %	
	Curah	Ketuk	Curah	Ketuk	Curah	Ketuk
II/3	1,7204	2,6067	1,9316	2,8716	12,28	10,16
II/4	1,7187	2,6684	1,8818	2,9140	9,49	9,20
II/5	1,5062	2,3849	1,6596	2,6368	10,18	10,56
II/6	1,6044	2,4600	1,7837	2,7314	11,18	15,10
	Rerata 1,6374	Rerata 2,5300	Rerata 1,8142	Rerata 2,8634	Rerata 10,78	Rerata 11,26

Dari Tabel 2 dapat dilihat bahwa kode II/3, II/4, II/5 dan II/6 adalah serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) yang diperoleh dari oksidasi pelet ( $UO_2 +$  hasil fisi) sinter yang pada pembuatan pelet mentahnya dikompaksi masing-masing pada tekanan 3,1584, 4,2112, 5,2640 dan 6,3168 ton/cm<sup>2</sup>[14]. Terhadap serbuk ( $UO_2 +$  hasil fisi) hasil kompaksi dengan variasi tekanan terlihat bahwa tekanan tidak memberikan pengaruh yang berarti terhadap densitas

sehingga dapat diambil reratanya. Serbuk yang belum digerus, densitas curah dan densitas ketuk rerata masing-masing adalah 1,6374 dan 2,5300 g/cm<sup>3</sup> dan setelah dilakukan penggerusan densitas rerata naik menjadi 1,8142 dan 2,8634 g/cm<sup>3</sup> atau kenaikan densitas rerata masing-masing adalah 10,78 dan 11,26%. Jadi terlihat efek dari penggerusan terhadap densitas. Hal ini terjadi karena penggerusan menyebabkan butir-butir menjadi lebih kecil yang dapat mengisi rongga-rongga diantara serbuk

sehingga volum yang ditempati menjadi kecil atau densitas menjadi lebih besar. Untuk mengukur densitas pada percobaan berikutnya, serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) telah mengalami penggerusan terlebih dahulu.

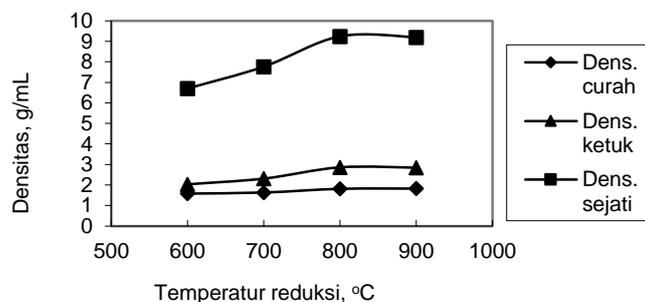
### Pengaruh temperatur proses reduksi terhadap densitas curah, ketuk dan sejati serta rasio O/U

Proses reduksi dilakukan sampai beberapa kali untuk mendapatkan serbuk dapat sinter (*sinterable*) ditinjau dari sisi densitas dan rasio O/U. Data pengaruh temperatur reduksi serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) terhadap densitas dan rasio O/U dari serbuk hasil reduksi ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) dapat dilihat pada Tabel 3 (lampiran) dan Gambar 1 dan 2.

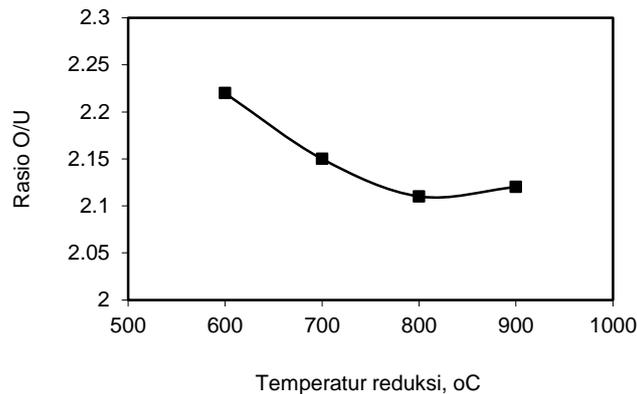
Pada Tabel 3 (lampiran) dan Gambar 1 dapat dilihat pengaruh temperatur reduksi terhadap densitas serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) dan rasio O/U. Densitas yang diukur adalah densitas curah, ketuk dan sejati. Dari empat jenis sampel diperoleh nilai densitas masing-masing yang kemudian dirata-rata. Reduksi pada temperatur rendah ( $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) memberikan nilai densitas rerata yang rendah pula yaitu  $1,5774$ ;  $2,0285$  dan  $6,6974\text{ g/cm}^3$  masing-masing untuk densitas curah, ketuk dan sejati. Hal ini dimungkinkan karena reduksi serbuk ( $U_3O_8$ ) menjadi ( $UO_2$ ) pada temperatur rendah tersebut belum sempurna. Kondisi tersebut nampak jika temperatur reduksi dinaikkan maka baik densitas curah, ketuk maupun sejati

bertambah besar sampai temperatur  $800\text{ }^\circ\text{C}$  yang berarti reaksi reduksi antara gas hidrogen dan serbuk  $U_3O_8$  lebih sempurna. Jika temperatur reduksi dinaikkan lagi maka densitas tidak bertambah besar bahkan relatif tetap karena reduksi  $U_3O_8$  dengan  $H_2$  menjadi  $UO_2$  sudah maksimal pada temperatur reduksi  $800\text{ }^\circ\text{C}$  dengan waktu reduksi selama 3 jam. Panas diperlukan agar terjadi reaksi reduksi antara  $U_3O_8$  dengan  $H_2$  yang dapat dijelaskan bahwa energi aktivasi minimum untuk reaksi pada temperatur  $600\text{-}800\text{ }^\circ\text{C}$  tersebut adalah sebesar  $15,2\text{-}17,4\text{ kkal/mol}$  yang harganya positif atau reaksi endoterm sehingga memerlukan panas<sup>[14]</sup>.

Pengaruh temperatur reduksi terhadap rasio O/U dari serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) dapat dilihat pada Tabel 3 (lampiran) dan Gambar 2. Nampak bahwa pada temperatur reduksi yang rendah ( $600\text{ }^\circ\text{C}$ ) harga rasio O/U rerata masih cukup tinggi yaitu  $2,22$ , tetapi jika temperatur reduksi dinaikkan, maka rasio O/U rerata menurun menjadi  $2,11$  pada temperatur reduksi  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , pada temperatur reduksi  $900\text{ }^\circ\text{C}$  relatif tetap. Untuk bahan bakar  $UO_2$  maka rasio O/U secara teoritis adalah  $2$ . Dalam percobaan, harga rasio O/U diharapkan mendekati  $2$ . Jika tidak, maka kemungkinan senyawa yang terbentuk adalah  $UO_2$  yang tercampur dengan sedikit  $U_3O_8$  atau  $UO_3$ . Nilai rasio O/U rerata yang mendekati  $2$  terjadi pada temperatur reduksi  $800\text{ }^\circ\text{C}$  dengan waktu  $3$  jam.



Gambar 1. Pengaruh temperatur reduksi terhadap densitas curah, ketuk dan sejati serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi).



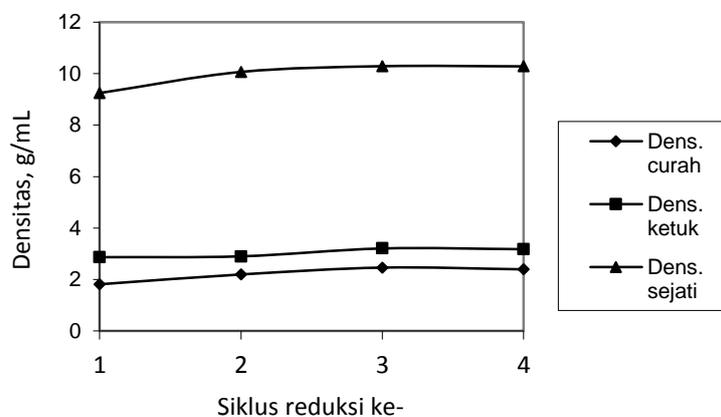
Gambar 2. Pengaruh temperatur reduksi terhadap rasio O/U serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi).

Dari uraian di atas dapat diketahui bahwa proses reduksi yang memberikan hasil yang relatif baik adalah temperatur 800 °C, waktu 3 jam dengan memberikan hasil yaitu densitas curah, dan ketuk rerata masing-masing adalah 1,8142 dan 2,8634  $g/cm^3$ , dan densitas sejati rerata adalah 9,2385  $g/cm^3$  (84,22%  $TD/Theoretical Density$  yaitu 10,96  $g/cm^3$ ) dan rasio O/U rerata sebesar 2,11. Proses reduksi di atas adalah reduksi ke-1, yang belum memberikan hasil yang optimal yaitu apabila ditinjau dari densitas sejati yang diperoleh yang masih rendah dibandingkan dengan densitas teoritisnya, demikian juga rasio O/U nya masih di atas nilai 2. Oleh karena itu, penelitian dilanjutkan dengan melakukan

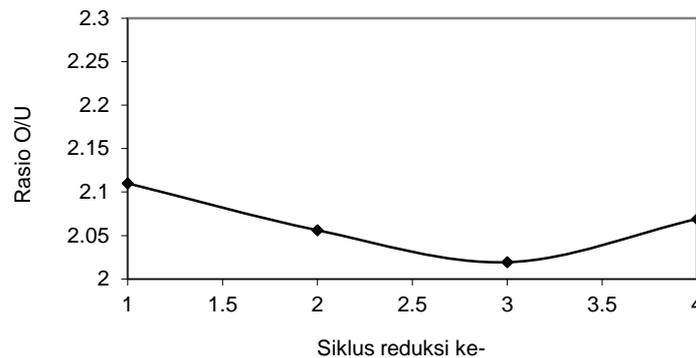
pengulangan proses reduksi ke-2, ke-3 dan ke-4.

#### Pengaruh siklus (pengulangan) proses reduksi

Pada proses reduksi ke-2, serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) hasil reduksi ke-1 di atas sebelumnya dikenai proses oksidasi hingga menjadi serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi). Serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) ini kemudian direduksi kembali menjadi serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) yang kemudian ditentukan densitas dan rasio O/U nya. Untuk reduksi ke-3 dan ke-4, dilakukan proses yang sama dengan proses reduksi ke-2. Temperatur reduksi yang digunakan adalah 800 °C dan waktu 3 jam. Data hasil percobaan dapat dilihat pada Tabel 4 (lampiran) dan Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Pengaruh siklus (pengulangan) proses reduksi terhadap densitas curah, ketuk dan sejati serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi).



Gambar 4. Pengaruh siklus (pengulangan) proses reduksi terhadap rasio O/U serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi)

Terlihat bahwa siklus (pengulangan) proses reduksi mempengaruhi densitas baik densitas curah, ketuk maupun sejati serta rasio O/U dari serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi). Pada proses reduksi siklus ke-1 densitas reratanya masih rendah, sedangkan pada siklus ke-2 dan ke-3 mengalami kenaikan, dan pada siklus ke-4 terjadi penurunan atau relatif tetap. Hal ini menunjukkan bahwa pada siklus reduksi ke-2 dan ke-3 telah terjadi penyempurnaan proses reduksi serbuk ( $U_3O_8 + 18$  hasil fisi) menjadi serbuk ( $UO_2 + 18$  hasil fisi) dibandingkan dengan reduksi ke-1. Pengulangan proses reduksi ke-4 tidak memberikan kenaikan densitas, bahkan terjadi penurunan atau relatif tetap. Pada siklus reduksi ke-3 diperoleh densitas terbaik dibandingkan dengan siklus lainnya yaitu densitas curah, ketuk dan sejati masing-masing 2,4594; 3,2096 dan 10,2866  $g/cm^3$ . Untuk densitas sejati, jika diperhitungkan dengan densitas teoritisnya diperoleh 93,77% TD, pencapaian densitas sejati ini sudah cukup baik.

Rasio O/U, pengulangan proses reduksi juga memberikan nilai yang lebih baik yang dapat dilihat pada Tabel 4 (lampiran) dan Gambar 4. Jika pada siklus reduksi ke-1 memberikan rasio O/U 2,11, maka pada siklus reduksi ke-2 menurun menjadi 2,056, pada siklus ke-3 menjadi 2,019 dan pada siklus ke-4 menjadi 2,069.

Rasio O/U yang diperoleh ini telah mendekati harga teoritis yaitu 2. Fenomena yang dapat dijelaskan dari hasil tersebut bahwa pada siklus ke-1 masih belum terjadi reaksi reduksi yang sempurna karena pada oksidasi pertama dengan bahan pelet ( $UO_2 + 18$  hasil fisi), serbuk hasil oksidasinya masih agak kasar sehingga reaksi reduksi tidak dapat berlangsung dengan baik demikian juga rasio O/U masih di atas 2. Pada siklus ke-2 dan seterusnya, kondisi serbuk sudah menjadi lebih homogen, merata sehingga reaksi lebih sempurna dan menghasilkan densitas lebih tinggi dan rasio O/U mendekati teoritis.

Peneliti lain dari Korea telah melakukan penelitian fabrikasi bahan bakar DUPIC berupa ( $UO_2 + 14$  jenis hasil fisi), dimana diperoleh karakteristik serbuk bahan bakar DUPIC yaitu *bulk density* (densitas curah) dan *tap density* (densitas ketuk) untuk bahan serbuk OREOX masing-masing 0,55 dan 0,83  $g/cm^3$ , untuk bahan serbuk yang digerus 2,10 dan 2,91  $g/cm^3$ [7]. Untuk proses OREOX 3 siklus yaitu oksidasi pada temperatur 400 °C dan reduksi dengan  $H_2$  pada temperatur 600 °C memberikan hasil berupa serbuk ( $UO_2 +$  hasil fisi) yang kemudian dibuat pelet mentah dan pelet sinter. Untuk siklus-1 diperoleh densitas pelet mentah dan pelet sinter masing-masing 6,588 dan 8,115  $g/cm^3$ , untuk siklus-

2 6,279 dan 9,048  $g/cm^3$ , dan untuk siklus-3 6,034 dan 9,585  $g/cm^3$  (87,37% TD)<sup>[9]</sup>. Jika dibandingkan dengan hasil dari Korea tersebut, maka penelitian yang dilakukan ini masih memberikan hasil yang cukup baik, walaupun masih berbentuk serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) dengan densitas teoritis 93,77% TD.

## SIMPULAN

Dari penelitian proses reduksi bahan bakar nuklir menjadi bahan bakar DUPIC ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) ini dapat ditarik simpulan bahwa penggerusan serbuk yang diperoleh dari hasil reduksi siklus ke-1 memberikan efek yaitu memperbesar densitas baik densitas curah maupun ketuk. Kenaikan densitas serbuk sebelum dan sesudah digerus untuk densitas curah dan ketuk rerata masing-masing 10,78 dan 11,26%. Efek temperatur proses reduksi terhadap densitas serbuk juga tampak bahwa pada temperatur relatif rendah yaitu 600 °C masih memberikan nilai densitas yang rendah, namun akan naik apabila temperatur ditingkatkan sampai 700 dan 800, sedangkan pada temperatur 900 °C, densitas relatif tetap atau menurun. Efek temperatur reduksi terhadap rasio O/U memberikan hasil bahwa semakin tinggi temperatur, semakin baik perolehan rasio O/U nya. Karakteristik serbuk khususnya densitas dan rasio O/U juga berbeda untuk tiap siklus reduksi, dimana pada siklus ke-1 densitas serbuk baik densitas curah, ketuk maupun sejati masih rendah yaitu rerata masing-masing 1,8142; 2,8634 dan 9,2385  $g/cm^3$  dengan rasio O/U yang cukup tinggi yaitu 2,11. Pada siklus reduksi ke-2 dan ke-3, densitas serbuk bertambah besar dan pada siklus ke-4 relatif tetap, sedangkan rasio O/U semakin mengecil mendekati harga 2. Pada penelitian ini diperoleh kondisi relatif baik yaitu pada temperatur proses reduksi 800 °C dengan waktu pemanasan 3 jam dan siklus reduksi yang ke-3 dan diperoleh serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil

fisi) dengan densitas curah, ketuk dan sejati masing-masing 2,4594; 3,2096 dan 10,2866  $g/cm^3$  (93,77% TD) serta rasio O/U sebesar 2,0192. Sesuai dengan karakteristik yang diperoleh, serbuk ( $UO_2$  + 18 hasil fisi) proses reduksi serbuk ( $U_3O_8$  + 18 hasil fisi) tersebut secara teoritis dapat digunakan untuk pembuatan bahan bakar DUPIC setelah melalui tahapan proses repeletisasi yaitu kompaksi, sintering dan fabrikasi.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Prayitno, Ir. Haryono SW, Bambang Suwondo, A.Md., Parimun, A.Md., Joko Maryoto, dan semua pihak yang telah membantu hingga selesainya penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Anonim. (2011, June). *Plutonium Uranium Extraction Process*. <http://www.britannica.com/Ebchecked/topic/465309/plutonium-uranium-extraction-process>.
2. Sigit. (2000). Tinjauan Beberapa Proses Daur Ulang Uranium Teriradiasi dengan Metoda Kering. PIDBBN V & P2BGN BATAN, Jakarta.
3. Prayitno, Fathurrachman, Ghaib Widodo, dan A. Paid. (1999). Survei Proses Ulang Cara Kering. PPI-P2TBDU, Jakarta.
4. Yang, M. S., Y. W. Lee, K. K. Bae, And S. H. Na. (1993). *Conceptual Study On The DUPIC Fuel Manufacturing Technology*. Proc. Int. Conf. and Technology Exhibition on Future Nuclear System, GLOBAL'93, Seattle.
5. Ko, W.I., and Kim, H.D. (2001). *Analysis of Nuclear Proliferation Resistance of DUPIC Fuel Cycle*. Journal of Nuclear Science and Technology, Vol. 38, No. 9, p.757-765.

6. Yang, M.S., Choi, H., Jeong, C.J., Song, K.C., Lee J.W., Park, G.I., Kim, H.D., Ko, W.I., Park, J.J., Kim, K.H., Lee, H.H., and Park, J.H. (2005). *The Status And Prospect Of Dupic Fuel Technology*. Korea Atomic Energy Research Institute, 150 Deokjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon.
7. Lee, J.W. (2004). *Introduction of DUPIC Fuel Fabrication*. KAERI, Taejon, Korea.
8. Park, J.J., Yang, M.S., Bae, K.K., Choi, H.B., Kim, H.D., Park, H.S. (2004). *Technology and Implementation of the DUPIC Concept for Spent Nuclear Fuel in the Rock*. KAERI, Taejon.
9. Kim, J.H., Kang, K.H., Kim, B.G., Lee, Jae.W., Lee, J.W. And Yang, M.S. (2004). *Optimization of Power/Pellet Fabrication for DUPIC Fuel*. KAERI, Taejon.
10. Lee, Jae, W., Lee, J.W., Kim, W.K., Park, G.I., Yang, M.S. (2004). *Study on Characterization and Fabrication of Simulated Pellets for the Fabrication of DUPIC Fuel*. KAERI, Taejon.
11. Sigit, Martoyo, Ngatidjo, Rahmat, P, R. Didiek, H. (2005). Pengaruh Siklus Proses Oksidasi-Reduksi Uranium Oksida Terhadap Densitas Dan Butiran Serbuk  $U_3O_8$  Dan  $UO_2$ . *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, Vol.1, No. 2, Juni 2005, hal 68 -76, P2TBDU BATAN, Jakarta, , ISSN 1907-2635.
12. Sigit, Noor Yudhi, Rahmat P., R.Didiek H. (2005). Karakterisasi Hasil Proses Oksidasi-Reduksi Siklus I Uranium Oksida. *Prosiding PPI Litdas Iptek Nuklir*, ISSN 0216-3128, P3TM BATAN, Yogyakarta, hal. 257-263.
13. Sigit, Ghaib Widodo, Haryono S.W., Supardjono, M., Nurwidjajadi. (2008). Pengaruh Temperatur, Waktu Oksidasi dan Konsentrasi  $ZrO_2$  Terhadap Densitas, Luas Permukaan dan Rasio O/U Hasil Reduksi ( $U_3O_8+ZrO_2$ ). *Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, ISSN 0852-4777, Vol.14 No.3, hal. 141-148.
14. Damunir. (2007). Aspek Kinetika Reaksi Kernel  $U_3O_8$  Dengan Gas  $H_2$  Terhadap Karakteristik Energi Aktivasi, Konstanta Laju Reaksi dan Rasio O/U Kernel  $UO_2$ . *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir*, ISSN 1907-2635, Vol 3, No. 2, hal 49-60, Jakarta.