

PENGARUH TEMPERATUR, WAKTU OKSIDASI DAN KONSENTRASI ZrO_2 TERHADAP DENSITAS, LUAS PERMUKAAN DAN RASIO O/U HASIL REDUKSI ($U_3O_8+ZrO_2$)

Sigit⁽¹⁾, Ghaib Widodo⁽¹⁾, Haryono, S.W⁽¹⁾, Supardjono M⁽²⁾, Nurwidjajadi⁽²⁾

1. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN

Kawasan Puspipstek, Serpong, Tangerang

2. Pusat Teknologi Akselerator Dan Proses Bahan-BATAN

Jalan Babarsari, Yogyakarta

ABSTRAK

PENGARUH TEMPERATUR, WAKTU OKSIDASI DAN KONSENTRASI ZrO_2 TERHADAP DENSITAS, LUAS PERMUKAAN DAN RASIO O/U HASIL REDUKSI ($U_3O_8+ZrO_2$). Telah dilakukan proses reduksi uranium oksida dan zirkonium oksida ($U_3O_8+ZrO_2$) dengan gas hidrogen pada temperatur 850 °C dan waktu 2 jam dalam sebuah tungku reduksi. Bahan tersebut diperoleh dari hasil oksidasi pelet (UO_2+ZrO_2) dengan konsentrasi ZrO_2 bervariasi dari 0 – 0,6% menjadi serbuk ($U_3O_8+ZrO_2$) pada temperatur 400 °C dan 500 °C dengan waktu 0,5 jam – 2 jam. Dari hasil oksidasi setiap parameter tersebut, bahan ($U_3O_8+ZrO_2$) dikenai proses reduksi hingga diperoleh kembali (UO_2+ZrO_2). Terhadap serbuk ini ditentukan densitas, luas permukaan dan rasio O/U. Hasil percobaan menunjukkan bahwa terjadi kenaikan densitas serbuk hasil reduksi yang berasal dari hasil oksidasi 400 °C dengan waktu 0,5 – 2 jam untuk konsentrasi ZrO_2 0,4%. Densitas tertinggi yang diperoleh untuk oksidasi 400 °C dan waktu 2 jam adalah densitas nyata (*apparent density*) 1,9006 g/mL dan densitas ketuk (*tap density*) 2,2490 g/mL, sedangkan untuk oksidasi 500 °C selama 2 jam densitas nyata 2,6580 g/mL dan densitas ketuk 2,7150 g/mL. Luas permukaan serbuknya naik sampai waktu oksidasi 1 jam kemudian menurun. Harga luas permukaan terbesar adalah 4,571798 m²/g untuk kondisi proses oksidasi 400 °C dengan waktu 1 jam. Rasio O/U yang diperoleh masih lebih tinggi dari harga teoritisnya karena UO_2 bercampur dengan ZrO_2 .

Kata Kunci : Konsentrasi ZrO_2 dalam pelet UO_2 , densitas, luas permukaan, rasio O/U, proses reduksi

ABSTRACT

INFLUENCE OF OXIDATION TEMPERATURE AND TIME AND ZrO_2 CONCENTRATION ON DENSITY, SURFACE AREA AND O/U RATIO OF ($U_3O_8+ZrO_2$) REDUCTION PRODUCT. Reduction process of uranium oxide and zirconium oxide ($U_3O_8+ZrO_2$) by hydrogen gas at temperature of 850 °C for 2 hours in a reduction furnace has been carried out. The material was obtained from oxidation product of (UO_2+ZrO_2) pellet became ($U_3O_8+ZrO_2$) powder at temperature of 400 °C and 500 °C for 0.5 – 2 hours with variation of ZrO_2 concentration from 0 – 0.6%. From the oxidation product of each parameter, the ($U_3O_8+ZrO_2$) was reduced to obtain (UO_2+ZrO_2) again. Density, surface area and O/U ratio were than determined. The experiments showed that density of the reduction product powder which obtained from oxidation product of 400 °C for 0.5 – 2 hours for

ZrO₂ concentration of 0.4% augmented. The highest density for 400 °C and 2 hours are apparent density 1.9006 g/mL and tap density 2.2490 g/mL, while for 500 °C and 2 hours are apparent density 2.6580 g/mL and tap density 2.7150 g/mL. The surface area of the powder increased up to oxidation time 1 hour than decreased. The highest value of surface area is 4.571798 m²/g for oxidation process condition 400 °C and time 1 hour. The O/U ratio obtained is still higher than its theoretical value due to UO₂ that mix with ZrO₂.

Key words : ZrO₂ concentration in UO₂ pellet, density, surface area, O/U ratio, reduction process.

PENDAHULUAN

Salah satu sasaran utama BATAN adalah berfungsinya *Sicence and Technology Base* tahun 2010 bidang energi. Guna mendukung sasaran tersebut, maka dilakukan berbagai penelitian dan pengembangan di bidang energi nuklir. Untuk itu pengembangan teknologi produksi bahan bakar nuklir reaktor daya terus ditingkatkan di antaranya penelitian dengan menambahkan hasil fisi pada bahan bakar uranium dioksida yang kemudian dikompaksi dan disinter pada temperatur 1700 °C hingga diperoleh pelet sinter^[1].

Seperti diketahui, uranium dioksida dalam bentuk pelet adalah bahan bakar untuk reaktor daya jenis *Light Water Reactor/LWR* (reaktor air ringan) dan *Pressurized Heavy Water Reactor/PHWR* (reaktor air berat bertekanan). Bahan bakar di dalam reaktor mengalami proses iradiasi yang cukup panjang. Dari reaksi berantai dihasilkan hasil fisi yang jenisnya cukup banyak, di mana salah satu unsur dominan adalah Zr^[2]. Zirkonium adalah unsur transisi bersifat keras, rapuh dan titik didihnya tinggi. Zirkonium banyak dijumpai dalam bentuk oksida karena memiliki afinitas yang besar terhadap hidrogen, karbon dan oksigen^[3]. Di dalam bahan bakar bekas, pelet UO₂ bercampur dengan hasil fisi, salah satunya adalah Zirkonium di mana zirkonium segera teroksidasi menjadi ZrO₂.

Dalam kaitannya dengan daur bahan bakar nuklir, daur ulang merupakan salah satu tahapan kegiatan yang tujuannya adalah menggunakan kembali bahan bakar seperti uranium yang ada dalam bahan bakar bekas.

Berbagai kegiatan daur bahan bakar nuklir dengan tingkat kecanggihan tinggi telah dikembangkan dan digunakan beberapa negara maju. Setiap negara sebenarnya ingin mengembangkan seluruh tahapan daur bahan bakar nuklir secara swa sembada, namun masih tergantung pada aspek tekno-ekonominya. Untuk itu perlu ditingkatkan keandalan tersedianya bahan, produk atau layanan tanpa memanfaatkan yang sudah tersedia di pasaran internasional. Oleh karena itu jadwal tersedianya instalasi daur bahan bakar nuklir hendaklah memperhitungkan optimasi pasokan bahan atau produk tersebut di atas. Adapun pada negara berkembang, penekanan penelitian dan pengembangan industri daur bahan bakar nuklir ditujukan pada kegiatan daur yang berkaitan dengan fabrikasi, pengelolaan elemen bakar bekas dan daur ulang bahan bakar bekas. Dalam daur bahan bakar nuklir, terdapat dua aspek yang perlu diperhatikan yaitu kesinambungan pasokan elemen bakar nuklir dan penanganan bahan bakar bekas. Oleh karena itu pengelolaan bahan bakar bekas dikembangkan sebagai kepakaran tersendiri yang sangat penting guna kelancaran operasi reaktor^[4,5].

Banyak cara atau metoda digunakan untuk mencapai tujuan daur bahan bakar nuklir khususnya pengelolaan bahan bakar bekas. Proses oksidasi-reduksi bahan bakar bekas (yang dalam hal ini berupa pelet UO₂+hasil fisi) adalah proses daur ulang guna memperoleh kembali serbuk UO₂ bercampur dengan hasil fisi yang memenuhi syarat untuk disinter yang selanjutnya digunakan kembali sebagai bahan bakar^[6].

Penelitian proses oksidasi pelet (UO₂+ZrO₂) telah dilakukan dengan berbagai variasi temperatur dan waktu oksidasi guna mengetahui efisiensi proses oksidasi dan densitas serbuk (U₃O₈+ZrO₂) yang diperoleh^[7]. Penelitian tersebut dilanjutkan dengan mempelajari pengaruh temperatur dan waktu oksidasi dan konsentrasi ZrO₂ dalam serbuk bahan bakar terhadap densitas, luas permukaan dan rasio O/U dari hasil reduksi serbuk (U₃O₈+ZrO₂) yang merupakan hasil oksidasi sebelumnya. Hasil reduksi serbuk (U₃O₈+ZrO₂) adalah serbuk (UO₂+ZrO₂). Terhadap serbuk (UO₂+ZrO₂) dilakukan penentuan densitas nyata (*apparent density*) dan densitas ketuk (*tap density*), luas permukaan menggunakan alat *Surface Areameter* serta rasio O/U secara gravimetri. Untuk menentukan densitas nyata, serbuk dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam gelas ukur sehingga diketahui volumenya, kemudian diketuk-ketuk dan ditentukan volumenya. Densitas adalah berat dibagi volum.

Luas permukaan serbuk ditentukan dengan metoda Brunauer-Emmett-Teller (BET)^[7], menurut persamaan :

$$\frac{1}{W\{(P_0/P) - 1\}} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C - 1}{W_m C} (P/P_0)$$

W = berat gas teradsorpsi pada tekanan relatif P/P₀, W_m = berat adsorbat, C = konstanta. Dibuat kurva P/P₀ versus 1/[W{(P/P₀) - 1}], diperoleh slope = (C-1)/W_mC dan intersep = 1/W_mC. Dengan mengetahui harga slope dan intersep maka W_m dan C dapat dihitung. Luas permukaan = (W_m N A_{cs}) / M, dengan N = bilangan Avogadro, A_{cs} = *molecular cross-sectional area*, M = berat molekul adsorban. Luas permukaan spesifik = luas permukaan / berat sampel.

Diharapkan hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai acuan dalam melaksanakan penelitian lanjutan yaitu proses

daur ulang cara kering dengan metoda oksidasi-reduksi.

TATA KERJA

Bahan yang digunakan adalah uranium oksida yang dicampur dengan zirkonium oksida yang semuanya berupa serbuk. Campuran serbuk kemudian dikompaksi menjadi pelet mentah lalu disinter pada temperatur 1700 °C selama 2 jam hingga diperoleh pelet (UO₂+ZrO₂) sinter. Pelet (UO₂+ZrO₂) sinter tersebut kemudian dioksidasi pada temperatur 400 - 500 °C dan waktu 0,5–2 jam menjadi serbuk (U₃O₈+ZrO₂). Serbuk hasil oksidasi yaitu (U₃O₈+ZrO₂) digunakan sebagai bahan untuk proses reduksi dalam penelitian ini. Konsentrasi ZrO₂ dalam bahan bakar divariasikan 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% dan 1,0%. Untuk mereduksi (U₃O₈+ZrO₂) digunakan gas hidrogen, sedangkan gas nitrogen digunakan untuk mengusir oksigen dari dalam tungku reduksi. Peralatan yang digunakan adalah tungku reduksi horisontal buatan Perancis, tungku kalsinasi untuk analisa secara gravimetri, *Surface Areameter* untuk analisa luas permukaan serta peralatan lainnya seperti gelas ukur untuk penentuan densitas, timbangan analitik dan krus porselin.

Serbuk (U₃O₈+ZrO₂) untuk setiap kondisi operasi oksidasi di atas kemudian ditempatkan dalam krus porselin lalu dimasukkan ke dalam tungku reduksi. Tungku reduksi dipanaskan perlahan-lahan, kemudian gas nitrogen dialirkan untuk mengusir oksigen. Setelah temperatur mencapai 600 °C gas hidrogen dialirkan, sementara aliran gas nitrogen dihentikan. Pemanasan dilanjutkan hingga temperatur mencapai 850 °C dan dijaga konstan selama 2 jam. Setelah itu tungku reduksi dimatikan, ditunggu sampai dingin baru sampel dikeluarkan. Hasil reduksi berupa campuran serbuk (UO₂+ZrO₂), kemudian diukur densitas nyata dan densitas ketuk menggunakan gelas ukur, luas permukaan menggunakan alat *Surface*

Areameter. Untuk menentukan densitas nyata, serbuk dengan berat tertentu dimasukkan ke dalam gelas ukur sehingga diketahui volumenya, kemudian diketuk-ketuk lalu ditentukan volumenya. Densitas adalah berat dibagi volum. Untuk analisa dengan *surface areameter*, kurang lebih 1,5 gram serbuk ($U_3O_8+ZrO_2$) dimasukkan ke dalam ampul kemudian dilakukan analisa hingga diperoleh data luas permukaan masing-masing sampel. Untuk menentukan rasio O/U, dilakukan analisa secara gravimetri. Sebanyak ± 5 gram serbuk (UO_2+ZrO_2) ditimbang, dimasukkan dalam krus porselin, lalu dipanaskan di dalam tungku kalsinasi pada temperatur tetap $900\text{ }^\circ\text{C}$ dan waktu 4 jam. Setelah dingin sampel dikeluarkan dan ditimbang untuk mengetahui berat akhir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pelet (UO_2+ZrO_2) sinter dioksidasi (dipanaskan) hingga berubah menjadi serbuk ($U_3O_8+ZrO_2$). Densitas serbuk ($U_3O_8+ZrO_2$) yang relatif tinggi diperoleh pada kondisi operasi temperatur pemanasan $400\text{ }^\circ\text{C}$, waktu 2 jam dan konsentrasi ZrO_2 0,2%. Pada kondisi tersebut densitas nyata yang diperoleh sebesar 2,1648 g/mL dan densitas ketuk 2,4826 g/mL^[8]. Penentuan densitas nyata dan densitas ketuk mengacu pada yang dilakukan terhadap hasil proses oksidasi-reduksi bahan bakar bekas di dalam *hot cell*. Pada penelitian ini, serbuk ($U_3O_8+ZrO_2$) hasil oksidasi di atas dikenai proses reduksi dengan gas hidrogen pada temperatur $850\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Hasil reduksi yang berupa serbuk (UO_2+ZrO_2) ditentukan karakteristiknya yaitu luas permukaan, dan rasio O/U. Pada Tabel 1 disajikan data densitas nyata dan ketuk, luas permukaan, dan rasio O/U dari serbuk (UO_2+ZrO_2) hasil reduksi yang sebelumnya dioksidasi pada temperatur dan waktu tertentu dan dengan variasi konsentrasi ZrO_2 dalam pelet (UO_2+ZrO_2) sinter. Karena jumlah sampel yang dianalisa berbeda-beda, maka luas permukaan dinyatakan dengan luas

permukaan spesifik. Untuk penentuan O/U secara gravimetri, jumlah sampel yang digunakan kurang lebih 5 gram. Pada Gambar 1, 2 dan 3 ditampilkan pengaruh temperatur, waktu oksidasi serta konsentrasi ZrO_2 terhadap densitas serbuk (UO_2+ZrO_2) hasil reduksi.

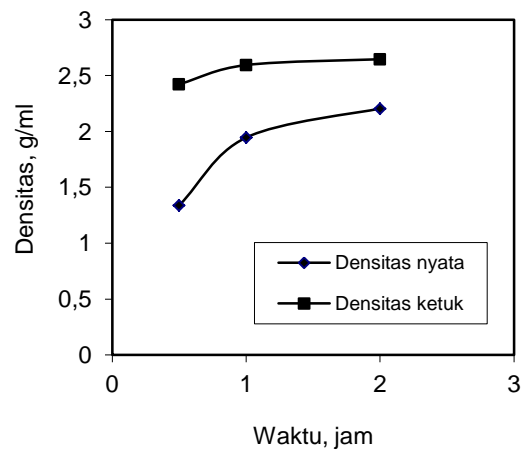
Proses reduksi serbuk U_3O_8 (konsentrasi ZrO_2 0 %) yang berasal dari pelet sinter, dioksidasi pada temperatur $400\text{ }^\circ\text{C}$ selama 0,5 jam memberikan densitas nyata dan ketuk serbuk UO_2 yang masih rendah yaitu masing-masing 1,0726 g/mL dan 1,5116 g/mL. Jika temperatur dinaikkan menjadi $500\text{ }^\circ\text{C}$ untuk waktu 0,5 jam, 1 jam dan 2 jam, maka terlihat bahwa semakin lama waktu yang diperlukan pada proses oksidasi dari pelet UO_2 menjadi serbuk U_3O_8 kemudian direduksi kembali menjadi UO_2 yang berbentuk serbuk maka densitas baik densitas nyata maupun densitas ketuk semakin besar pula (Tabel 1 Gambar 1). Hal ini dapat dimengerti karena semakin tinggi temperatur dan lama waktu oksidasi maka reaksi antara UO_2 dengan oksigen menjadi U_3O_8 lebih sempurna sehingga bila U_3O_8 ini direduksi kembali menjadi UO_2 akan memberikan kerapatan yang lebih besar.

Jika ZrO_2 ditambahkan ke dalam UO_2 sebanyak 0,4%, maka untuk kondisi proses oksidasi baik $400\text{ }^\circ\text{C}$ maupun $500\text{ }^\circ\text{C}$ dengan kenaikan waktu dari 0,5, 1 sampai 2 jam telah menaikkan densitas. Untuk temperatur $400\text{ }^\circ\text{C}$, densitas nyata naik dari 1,0805 g/mL ke 1,9006 g/mL dan densitas ketuk dari 1,6966 g/mL ke 2,2490 g/mL, dan untuk temperatur $500\text{ }^\circ\text{C}$, densitas nyata naik dari 1,7232 g/mL ke 2,6580 g/mL dan densitas ketuk dari 2,3396 g/mL ke 2,7150 g/mL. Dibandingkan dengan UO_2 tanpa ZrO_2 seperti di atas, maka keberadaan ZrO_2 sebagai simulasi hasil fisi Zr telah mempengaruhi densitas serbuk hasil proses reduksi (Tabel 1, Gambar 2 dan 3). Adapun untuk konsentrasi ZrO_2 0,2%, densitas yang diperoleh juga lebih tinggi daripada UO_2 hasil reduksi tanpa ZrO_2 , demikian juga untuk

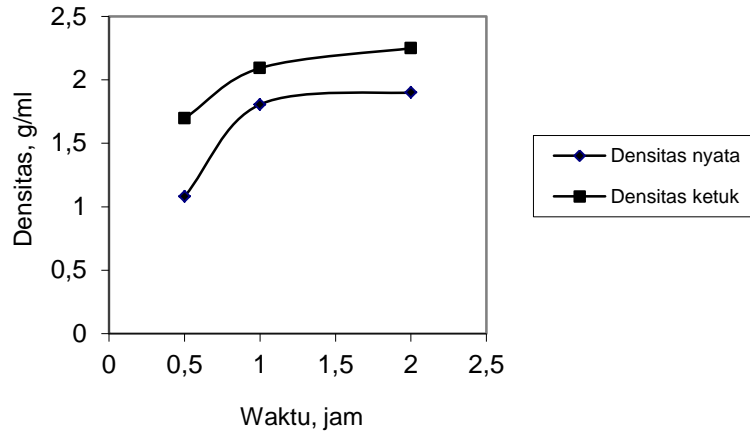
konsentrasi 0,6%. Untuk konsentrasi ZrO_2 0,8% dan 1%, pelet yang diperoleh pecah-pecah dan sulit diidentifikasi sehingga tidak bisa ditentukan densitasnya.

Tabel 1. Densitas, luas permukaan spesifik, dan rasio O/U serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) hasil reduksi

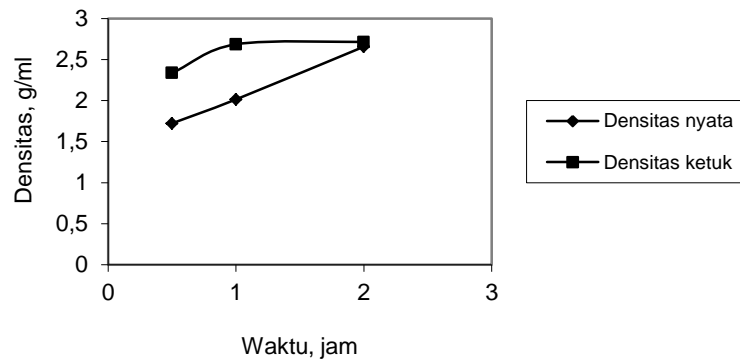
Kon-sentrasi ZrO_2 , %	Kondisi proses oksidasi		Berat sampel (g)	Densitas, g/mL		Luas Permukaan spesifik m^2/g	Rasio O/U
	Temperatur $^{\circ}C$	Waktu (jam)		Nyata	Ketuk		
0	400	0,5	0,8945	1,0726	1,5116	3,558919	2,13
	500	0,5	0,6633	1,3389	2,4229	2,881563	
		1	1,0042	1,9455	2,5940	4,036339	
		2	1,5714	2,2049	2,6458	2,845017	
0,2	400	2	0,8020	1,8206	2,3408	4,136283	2,20
	500	1	0,8380	1,7131	2,2206	4,180809	2,17
0,4	400	0,5	1,3240	1,0805	1,6966	4,356651	2,27
		1	1,0577	1,8062	2,0927	4,571798	2,23
		2	0,8717	1,9006	2,2490	4,275953	2,16
	500	0,5	0,7397	1,7232	2,3396	4,275126	2,30
		1	0,8594	2,0152	2,6869	4,088111	2,25
		2	0,9440	2,6580	2,7150	3,480571	2,25
0,6	400	2	0,9391	1,8060	2,3154	4,634296	2,23



Gambar 1. Pengaruh waktu oksidasi pada temperatur tetap 500 $^{\circ}C$ dan konsentrasi ZrO_2 0% terhadap densitas serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) hasil reduksi



Gambar 2. Pengaruh waktu oksidasi pada temperatur tetap 400 °C dan konsentrasi ZrO₂ 0,4% terhadap densitas serbuk (UO₂+ZrO₂) hasil reduksi

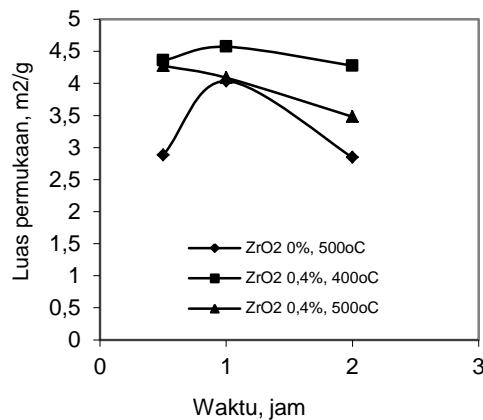


Gambar 3. Pengaruh waktu oksidasi pada temperatur tetap 500 °C dan konsentrasi ZrO₂ 0,4% terhadap densitas serbuk (UO₂+ZrO₂) hasil reduksi

Setelah ditentukan densitasnya, dilakukan pengukuran luas permukaan serbuk UO₂ (ZrO₂ 0%) dan (UO₂+ZrO₂) hasil reduksi yang dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 4. Karena luas permukaan tergantung dari banyaknya serbuk, maka perlu distandarkan yaitu dinyatakan dalam satuan luas per berat sampel (m²/g). Terlihat bahwa luas permukaan serbuk baik UO₂ (konsentrasi ZrO₂ 0%), maupun (UO₂+ZrO₂) dengan konsentrasi ZrO₂ 0,4% mula-mula naik sampai waktu oksidasi 1 jam, kemudian menurun. Untuk kondisi proses oksidasi 400 °C waktu 0,5 jam dan konsentrasi ZrO₂ 0,4% diperoleh luas permukaan serbuk hasil reduksi sebesar 4,356651 m²/g naik menjadi 4,571798 m²/g bila waktunya menjadi 1 jam namun menurun menjadi 4,275953 m²/g untuk waktu oksidasi 2 jam. Hal ini dapat dijelaskan bahwa dengan waktu yang relatif

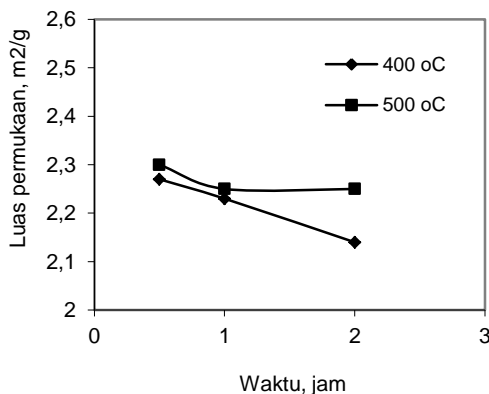
singkat (0,5 jam) reaksi oksidasi antara oksigen dan pelet uranium belum sempurna sehingga serbuk yang diperoleh masih agak kasar. Apabila waktu ditambah menjadi 1 jam maka reaksi menjadi lebih sempurna. Namun setelah waktu oksidasi ditambah menjadi 2 jam, kemungkinan terjadi pembesaran butir. Berawal dari kondisi bahan yang berbeda ini, yang kemudian dilakukan proses reduksi, maka menyebabkan luas permukaan yang berbeda yaitu kenaikan dan penurunan luas permukaan. Untuk temperatur oksidasi 500 °C dengan waktu yang sama didapat luas permukaan masing-masing 4,275126 m²/g, 4,088111 m²/g dan 3,480571 m²/g. Luas permukaan yang besar akan memberikan kontak yang semakin luas sehingga reaksi akan berlangsung lebih baik. Untuk konsentrasi ZrO₂ 0,2% luas permukaan serbuk (UO₂+ZrO₂) relatif lebih kecil dari pada

serbuk dengan konsentrasi ZrO_2 0,4,% dan 0,6%.



Gambar 4. Pengaruh waktu oksidasi terhadap Luas permukaan serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) hasil reduksi pada berbagai konsentrasi ZrO_2 dan temperatur oksidasi

Hasil penentuan rasio O/U secara gravimetri dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 5 khususnya untuk konsentrasi ZrO_2 0,4%.



Gambar 5. Pengaruh waktu oksidasi terhadap rasio O/U untuk temperatur oksidasi 400 °C dan 500 °C dan konsentrasi ZrO_2 0,4%

Dari Tabel 1 dan Gambar 5 terlihat bahwa untuk konsentrasi ZrO_2 0,4% dan temperatur oksidasi 400 °C dan 500 °C rasio

O/U dari serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) mengalami penurunan jika waktu oksidasinya bertambah lama. Nilai rasio O/U yang baik adalah 2 (teoritis), sedangkan hasil yang diperoleh masih di atas rasio O/U teoritis. Hal ini menunjukkan belum sempurnanya reaksi reduksi U_3O_8 oleh H_2 menjadi UO_2 sehingga rasio O/U masih belum memenuhi kondisi teoritis. Hal ini dapat dilihat pula dengan bertambah besarnya konsentrasi ZrO_2 sampai 0,8 % dan 1% dalam campuran dengan UO_2 menyebabkan rasio O/U bertambah besar masing-masing menjadi 2,30 dan 2,33. Khusus untuk sampel dengan konsentrasi ZrO_2 0,8% dan 1 % hanya ditentukan rasio O/U karena keterbatasan jumlah pelet dan pelet mengalami pecah sewaktu dilakukan proses sinter.

SIMPULAN

Pada konsentrasi ZrO_2 0,4% dengan kondisi proses oksidasi 400 °C dengan kenaikan waktu 0,5 – 2 jam memberikan kenaikan densitas serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) hasil reduksi yaitu densitas nyata naik dari 1,0805 g/mL ke 1,9006 g/mL dan densitas ketuk dari 1,6966 g/mL ke 2,2490 g/mL, sedangkan untuk 500 °C, densitas nyata naik dari 1,7232 g/mL ke 2,6580 g/mL dan densitas ketuk dari 2,3396 g/mL ke 2,7150 g/mL

Luas permukaan serbuk ($UO_2 + ZrO_2$) hasil reduksi dengan konsentrasi ZrO_2 0,4% mula-mula naik sampai waktu oksidasi 1 jam, kemudian menurun. Luas permukaan terbesar diperoleh pada kondisi proses oksidasi 400 °C dengan waktu 1 jam sebesar 4,571798 m²/g.

Kenaikan konsentrasi ZrO_2 dalam ($UO_2 + ZrO_2$) dari 0%, 0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% sampai 1% memberikan kecenderungan nilai rasio O/U semakin besar. Rasio O/U yang diperoleh masih lebih tinggi dari harga teoritis karena bahan bakar UO_2 bercampur dengan ZrO_2 sebagai simulasi hasil fisi. Kondisi operasi

untuk proses reduksi perlu diubah misalnya dengan menaikkan temperatur dan waktu.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Staf dan Teknisi BBRD-P2TBDU (sekarang B3N-PTBN) dalam pembuatan pelet serta Staf dan Teknisi kelompok TPBB-BKTPB-PTAPB yang telah membantu proses reduksi hingga selesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. ABDUL LATIEF, TATA TERBIT S., DJOKO KISWORO, SLAMET PRIBADI, ARIEF, S.A," Pengaruh Tekanan Pengompakan, Komposisi Er_2O_3 dan Penyinteran pada Temperatur Rendah terhadap Kualitas Pelet $\text{UO}_2+\text{Er}_2\text{O}_3$ ", J.Tek.Bhn.Nuklir ", vol.1, no.2, hal. 58-67, ISSN 1907-2635, Juni 2005
2. KLEYKAMP, H," *The Chemical State of Fission Products in Oxide Fuels at Different Stages of The Nuclear Fuel Cycle*, Nuclear Technology ", Vol. 80, pp. 412-422, 1988
3. <http://www.periodic-table.org.uk/element-zirconium.htm>.
4. SOENTONO, S," Pengembangan Industri Daur Bahan Bakar Nuklir Untuk Menopang Program PLTN, PPI Litdas Iptek Nuklir ", Yogyakarta, 1992
5. SETTLE, F," *Nuclear Chemistry. Recycling Spent Reactor Fuel*, ALSOS Digital Library for Nuclear ", Kennesaw State University, 2005
6. TORGERSON, D.F, BOCZAR, P.G., DASTUR, A.R.," CANDU Fuel Cycle Flexibility ", 9th Pacific Basin Nuclear Conference, Sydney, 1994
7. ANONIM," *Quantachrome Corporation* ", NOVA – 1000, Gas Sorption Analyzer, 1993
8. GHAIB WIDODO, HARYONO, S.W., HENDRO WAHYONO, SIGIT , " Proses Oksidasi Pelet (UO_2+ZrO_2) Sinter ", J.Tek.Bhn.Nukl., vol.4, no.1, ISSN 1907-2635, Januari 2008.