

## PENGARUH *BURN-UP* TERHADAP KARAKTERISTIK PELET SINTER SIMULASI BAHAN BAKAR BEKAS

Erilia Yusnitha, Tri Yulianto, Ety Mutiara

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314

e-mail: erilia@batan.go.id

(Naskah diterima: 02-09-2013, disetujui: 24-09-2013)

### ABSTRAK

**PENGARUH *BURN-UP* TERHADAP KARAKTERISTIK PELET SINTER SIMULASI BAHAN BAKAR BEKAS.** Telah dilakukan penelitian pengaruh *burn-up* terhadap karakteristik pelet sinter simulasi bahan bakar bekas dengan variasi *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan karakter bahan bakar bekas simulasi yang diharapkan mampu mendekati sifat dan karakter bahan bakar bekas yang sebenarnya. Karakterisasi serbuk simulasi hasil fisi dengan variasi *burn-up* yang dianalisis antara lain *bulk density*, *tap density*, *surface area* dan rasio O/U. Hasil pengukuran serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU antara lain *bulk density* : 1,0250 g/cm<sup>3</sup>, *tap density* : 1,9330 g/cm<sup>3</sup>, *surface area* : 0,8751 m<sup>2</sup>/g dan rasio O/U : 2,0319, sedangkan untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU diperoleh *bulk density* : 1,3410 g/cm<sup>3</sup>, *tap density* : 2,0443 g/cm<sup>3</sup>, *surface area* : 2,6688 m<sup>2</sup>/g dan rasio O/U : 2,0381. Kemudian serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dilakukan pengompakan pada tekanan 3 Mp, 4 Mp, 5 Mp, 6 Mp, 8 Mp dan 9 Mp. Serbuk simulasi bahan fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU pengompakan pada tekanan 4 Mp, 6 Mp, 7 Mp, 8 Mp dan 9 Mp. Masing-masing hasil proses pengompakan dilakukan penyinteran menjadi pelet sinter simulasi bahan bakar bekas kemudian dikarakterisasi densitas dan mikrostrukturnya. Densitas tertinggi pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU maupun *burn-up* 60 MWd/kgU terdapat pada tekanan pengepressan 9 Mp yaitu masing-masing sebesar 9,9959 g/cm<sup>3</sup> dan 9,5490 g/cm<sup>3</sup>. Pengamatan mikrostruktur menunjukkan semakin besar *burn-up* menyebabkan semakin kecil ukuran butir pelet sinter.

**Kata kunci:** simulasi hasil fisi, *tap density*, *bulk density*, *surface area*, rasio O/U, mikrostruktur.

### ABSTRACT

**EFFECT OF *BURN-UP* ON THE CHARACTERISTICS OF SINTERED PELLETS OF SIMULATED SPENT FUEL.** Effect of *burn-up* on the characteristics of sintered pellets of simulated spent fuel with *burnup* variation of 40 MWd/kgU and 60 MWd/kgU has been studied. The aim of this research is to obtain simulated spent fuel whose properties and characteristics are in close agreement with sintered pellets of spent fuel. The characteristics of simulated fission products powder for variation of *burn-up* such as *bulk density*, *tap density*, O/U ratio, and *surface area* were measured. The measurement result for simulated fission products powder of 40 MWd/kgU *burn-up* are *bulk density* : 1.0250 g/cm<sup>3</sup>, *tap density* : 1.9330 g/cm<sup>3</sup>, O/U ratio: 2.0319 and *surface area* : 0.8751 m<sup>2</sup>/g, while the measurement result of simulated fission

products powder of 60 MWd/kgU burn-up are bulk density :  $1.3410 \text{ g/cm}^3$ , tap density:  $2.0443 \text{ g/cm}^3$ , O/U ratio: 2.0381 and surface area :  $2.6688 \text{ m}^2/\text{g}$ . The simulated fission products powder of 40 MWd/kgU burn-up were pressed at a pressure of 3 Mp, 4 Mp, 5 Mp, 6 Mp, 8 Mp and 9 Mp, and the simulated fission products powder of 60 MWd/kgU burn-up were pressed at a pressure of 4 Mp, 6 Mp, 7 Mp, 8 Mp and 9 Mp to produce green pellets. The green pellets were sintered to produce simulated sintered pellets of spent fuel. The characteristics of simulated sintered pellets of spent fuel such as density and microstructure were measured. The highest density of the simulated spent fuel for 40 MWd/kgU burn-up and 60 MWd/kgU burn-up was obtained at a pressure of 9 Mp, i.e.  $9.9959 \text{ g/cm}^3$  and  $9.5490 \text{ g/cm}^3$  respectively. The microstructure analysis shows that the grain size of the sintered pellets decreases with increasing burn-up.

**Keywords:** simulated fission product, tap density, bulk density, surface area, O/U ratio, microstructure.

## PENDAHULUAN

Program penelitian pengembangan bahan bakar nuklir terus dilakukan untuk mendukung program PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) sebagai alternatif penyedia energi di Indonesia. Salah satunya adalah teknologi proses DUPIC (*Direct Use of spent PWR fuel in CANDU reactor*). Teknologi ini sangat bermanfaat bagi negara yang memiliki dua tipe reaktor yaitu LWR (*Light Water Reactor*) seperti PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan HWR (*Heavy Water Reactor*) seperti reaktor CANDU (*Canadian Deuterium Uranium Reactor*). Dalam penelitian ini diharapkan dengan mempelajari Teknologi DUPIC bahan bakar bekas PWR dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar reaktor CANDU. Hal ini dimungkinkan karena bahan bakar bekas PWR masih mengandung bahan fisil yang masih dapat digunakan untuk membangkitkan energi. Bahan fisil yang terkandung di dalam bahan bakar bekas PWR sekitar 1,5 % berat atau dua kali lebih besar daripada yang berada di dalam uranium alam sekitar 0,7 % berat yang biasa digunakan sebagai bahan bakar reaktor CANDU<sup>[1-5]</sup>.

Manfaat dari teknologi DUPIC adalah bahan bakar bekas PWR dapat digunakan untuk membangkitkan listrik pada reaktor CANDU, mengurangi jumlah bahan

bakar bekas karena meningkatnya *burn-up* CANDU dan proses ini memiliki ketahanan proliferasi<sup>[5-6]</sup>. Dengan siklus bahan bakar DUPIC, dapat menghemat sumber uranium hingga 20% dan mengurangi bahan bakar bekas hingga 65%<sup>[3]</sup>, dan dapat menghemat pemakaian uranium sampai 25% pada *burn up* bahan bakar bekas reaktor CANDU 7,5 MWd/kgU, mengurangi jumlah bahan bakar bekas (spent fuel) 70% per unit energi listrik yang dihasilkan<sup>[7]</sup>. Teknologi DUPIC telah dikembangkan sejak tahun 1991 oleh negara Amerika, Canada dan Korea Selatan<sup>[2,5,8]</sup>. Menurut pustaka<sup>[9]</sup> pada pertengahan tahun 2000, Korea berhasil mendesain dan memfabrikasi prototip pelet DUPIC menggunakan bahan bakar bekas dalam skala laboratorium. Ada beberapa negara yang berminat dengan DUPIC antara lain Cina dan Ukraine<sup>[10]</sup>. Dalam IAEA-TECDOC 1434<sup>[11]</sup>, disebutkan bahwa bahan bakar DUPIC : bahan bakar bekas PWR difabrikasi menjadi bahan bakar PHWR (*Pressurized Heavy Water Reactor*) tanpa proses basah, meminimalisir jumlah HLW (*High Level Waste*) dan mengurangi limbah *mining* dan *milling*. Pembakaran aktinida dalam PHWR dapat mengurangi radiotoksitas bahan bakar.

Kegiatan yang dilakukan pada penelitian ini adalah penyiapan bahan yaitu mencampur serbuk uranium dioksida ( $\text{UO}_2$ ) dengan serbuk bahan kimia oksida sebagai

simulasi bahan fisi sesuai dengan komposisi perhitungan hasil fisi yang dilakukan dengan menggunakan program Origen. Komposisi hasil fisi yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini adalah data yang diperoleh dari data penelitian menggunakan program Origen yang dilakukan oleh para peneliti sebelumnya. Program Origen berdasarkan pustaka<sup>[12]</sup> adalah kode komputer yang digunakan untuk melakukan simulasi siklus bahan bakar nuklir dan menghitung komposisi radionuklida dan *burnup* bahan bakar bekas.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh perbedaan *burn-up* terhadap karakter pelet sinter hasil simulasi bahan bakar bekas. Sehingga dapat mengetahui karakter bahan bakar bekas simulasi yang diharapkan mampu mendekati sifat dan karakter bahan bakar bekas yang sebenarnya. Bahan bakar bekas dengan *burn-up* yang berbeda akan memberikan komposisi produk fisi yang berbeda. Komposisi produk fisi akan memberikan sifat atau karakter serbuk maupun pelet sinter simulasi bahan bakar bekas. Pengukuran langsung sifat bahan bakar DUPIC sangat sulit dilakukan di laboratorium karena level radiasi yang tinggi. Sehingga dalam penelitian ini digunakan bahan bakar simulasi DUPIC. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman tentang penggunaan teknologi DUPIC dan memperoleh data-data teknis yang dapat digunakan untuk mengkaji proses DUPIC lebih lanjut.

## TATA KERJA

### Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah serbuk  $\text{UO}_2$  yang ditambahkan bahan kimia oksida sebagai bahan simulasi hasil fisi seperti  $\text{SrO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{MoO}_2$ ,  $\text{RuO}_2$ ,  $\text{Rh}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PdO}$ ,  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{Pr}_6\text{O}_{11}$ ,  $\text{Nd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Sm}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CdO}$ ,

$\text{Eu}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ . Bahan lain adalah Zn stearat yang digunakan sebagai pelumas pada saat pengompakan serbuk menjadi pelet mentah. Program komputer Origen digunakan untuk memperkirakan komposisi simulasi bahan bakar bekas dengan  $\text{UO}_2$  pengkayaan  $\text{U}^{235} = 4\%$ , Lama penyimpanan 5 tahun pada *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU. Komposisi masing-masing *burn-up* diperlihatkan dalam Tabel 1 dan 2 (lampiran).

Alat yang digunakan dalam penelitian antara lain *bulk density meter*, *tap density meter*, *surface area meter*, mikroskop optik, *micro-hardness tester*, *mixer*, mesin *final pressing* dan tungku sintering.

### Cara kerja

Serbuk  $\text{UO}_2$  yang telah ditambahkan bahan kimia oksida sebagai bahan simulasi hasil fisi sesuai dengan komposisi bahan bakar bekas yang dihitung dari program komputer Origen dicampur hingga homogen. Kemudian serbuk dikarakterisasi seperti uji *tap density*, uji *bulk density*, uji *surface area* dan uji rasio O/U. Selanjutnya dilakukan pembuatan pelet mentah dengan metode pengompakan yang diikuti karakterisasi pelet mentah meliputi pengukuran dimensi dan penimbangan berat untuk pengukuran densitas pelet mentah. Parameter pengompakan adalah 3 Mp, 4 Mp, 5 Mp, 6 Mp, 8 Mp dan 9 Mp untuk serbuk simulasi bahan fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU, sedangkan serbuk simulasi bahan fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU dikompakan pada tekanan 4 Mp, 6 Mp, 7 Mp, 8 Mp dan 9 Mp. Proses selanjutnya adalah proses sintering yang dilakukan pada suhu 1700 °C ditahan selama 3 jam untuk mengubah pelet mentah menjadi pelet sinter. Pelet sinter yang didapatkan selanjutnya dilakukan karakterisasi antara lain pengukuran densitas pelet sinter dan pengamatan mikrostruktur.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Serbuk  $UO_2$  yang sudah dicampur dengan bahan simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU dikarakterisasi antara lain *bulk density*, *tap*

*density*, *surface area* dan rasio O/U. Dalam Tabel 3 ditunjukkan data hasil karakterisasi serbuk untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan 60 MWd/kgU.

Tabel 3. Data Hasil Pengukuran *Bulk Density*, *Tap Density*, *Surface area* dan Rasio O/U.

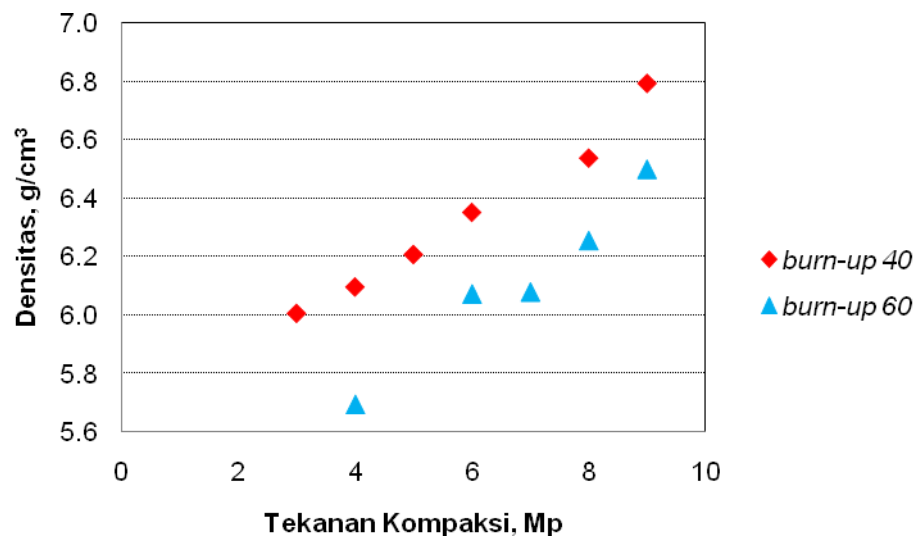
No.	Bahan	Rasio O/U	<i>Bulk Density</i> , g/cm <sup>3</sup>	<i>Tap Density</i> , g/cm <sup>3</sup>	<i>Surface area</i> , m <sup>2</sup> /g
1	Serbuk simulasi hasil fisi dengan <i>burn-up</i> 40 MWd/kgU	2,0319	1,0250	1,9330	0,8751
2	Serbuk simulasi hasil fisi dengan <i>burn-up</i> 60 MWd/kgU	2,0381	1,3410	2,0443	2,6688

Pustaka<sup>[13]</sup> menunjukkan bahwa informasi perilaku oksidasi bahan bakar nuklir oksida diperlukan untuk mengevaluasi kestabilan selama iradiasi di reaktor karena rasio O/U (oksigen/uranium) mempengaruhi sifat termal seperti titik leleh, panas spesifik, ekspansi termal, dan konduktivitas termal. Tabel 3 menunjukkan bahwa perbedaan rasio O/U pada serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dengan serbuk simulasi hasil fisi *burn-up* 60 MWd/kgU tidak signifikan.

Hasil pengukuran *bulk density*, *tap density* serbuk simulasi hasil fisi pada *burn-up* 40 MWd/kgU dengan serbuk simulasi hasil fisi *burn-up* 60 MWd/kgU menunjukkan adanya perbedaan walaupun tidak signifikan. Perbedaan keduanya tersebut terjadi karena ada perbedaan komposisi simulasi bahan bakar yang berupa bahan kimia oksida yang ditambahkan ke dalam serbuk  $UO_2$ . Pada pustaka<sup>[14]</sup> dikatakan bahwa *bulk density* sangat berkaitan dengan friksi antar partikel. Semakin besar *bulk density* semakin besar kemampuan laju alirnya, karena friksi inter partikelnya lebih kecil, sedangkan *tap density* menunjukkan

densitas yang dicapai dengan adanya vibrasi tanpa ada penekanan. *Tap density* dapat menunjukkan friksi antar partikel. Partikel yang berukuran semakin kecil akan memiliki friksi antar partikel yang lebih besar. Dari hasil yang diperoleh pada Tabel 1 menunjukkan bahwa dengan semakin besar *burn-up* maka *bulk density* dan *tap density* pada serbuk simulasi juga semakin besar.

Hasil *surface area* menunjukkan perbedaan yang signifikan antara serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dengan serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU, hal ini dikarenakan ukuran partikel serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU yang berbeda dengan serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU. Dari teori dikatakan bahwa semakin besar *surface area*, maka semakin besar friksi inter partikel sehingga partikel akan kurang efisien dalam kemampuan laju alir dan kemampuan *packing*<sup>[14]</sup>. Hal tersebut dalam proses peletisasi akan berpengaruh terhadap hasil pengompakan, masing-masing seperti ditunjukkan pada Gambar 1.

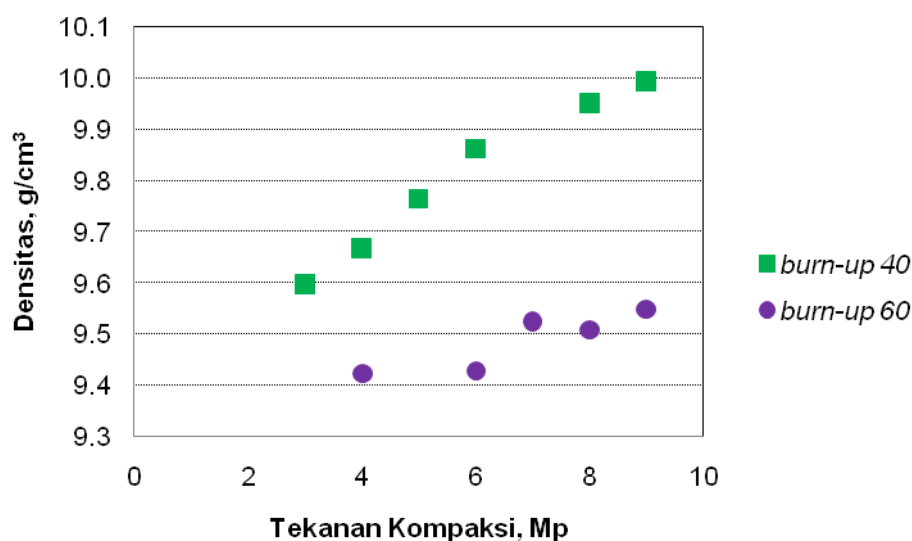


Gambar 1. Hubungan antara tekanan kompaksi terhadap densitas pelet mentah simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU.

Pada Gambar 1 menunjukkan hasil pengukuran densitas pelet mentah dengan ukuran pelet bahan bakar PWR untuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dibandingkan dengan simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU pada variasi tekanan kompaksi. Pada Gambar 1 tersebut diperlihatkan bahwa semakin besar tekanan pengompakan maka akan semakin besar densitas pelet mentah yang diperoleh. Untuk densitas pelet mentah simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU lebih rendah daripada densitas pelet mentah simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU. Hal ini dikarenakan semakin besar jumlah hasil fisi yang ditambahkan ke serbuk  $\text{UO}_2$  mempengaruhi kemampuan serbuk untuk dipress menjadi pelet mentah. Penjelasan ini juga diperkuat dari data pengukuran *surface area* dalam Tabel 1, untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU memiliki *surface area* yang

lebih besar dari *burn-up* 40 MWd/kgU. Hal ini menunjukkan bahwa serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU memiliki friksi antar partikel yang lebih besar sehingga kemampuan laju alir dan kemampuan *packing* lebih rendah dari serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU, sehingga densitas pelet mentah simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU lebih kecil dari pada densitas pelet mentah simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU.

Setelah mengalami proses sintering, pelet sinter yang diperoleh kemudian dilakukan perhitungan densitas dan pengamatan mikrostruktur. Densitas pelet sinter dihitung dengan cara yang sama seperti cara menghitung densitas pelet mentah. Pada Gambar 2 diperlihatkan densitas pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan dengan *burn-up* 60 MWd/kgU.



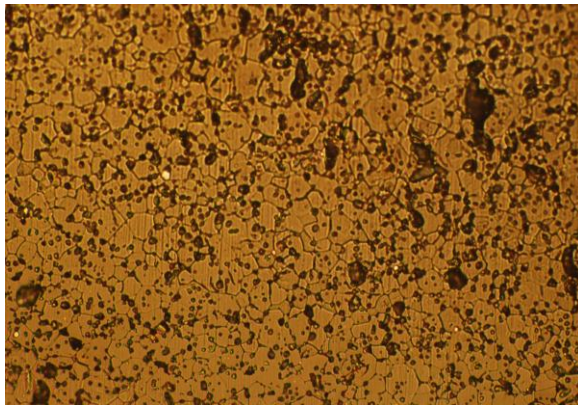
Gambar 2. Hubungan antara tekanan kompaksi terhadap densitas pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU.

Dari hasil sintering diperoleh jumlah pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU yang mengalami retak sejumlah 67,3469% dari produksi pelet sinter, sedangkan jumlah pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU yang retak sejumlah 8,6956%. Fenomena terjadinya retak pada pelet sinter dengan *burn-up* yang lebih tinggi dimungkinkan karena hasil fisi yang berupa bahan kimia oksida yang dicampurkan ke dalam serbuk  $UO_2$  pada proses pembuatan serbuk mengalami dekomposisi pada suhu di bawah suhu sintering. Beberapa bahan kimia yang ditambahkan ke serbuk  $UO_2$  memiliki sifat dekomposisi di bawah suhu sintering, antara lain:  $MoO_2$ ,  $Rh_2O_3$ ,  $PdO$  dan  $CdO$ . Proses dekomposisi bahan kimia ini menghasilkan senyawa lain dan gas. Gas yang terbentuk ini kemudian keluar dari pelet sehingga menyebabkan pelet sinter retak atau *crack*. Hal ini diperkuat seperti

yang diutarakan pustaka<sup>[15]</sup> bahwa parameter kunci yang mempengaruhi karakteristik fabrikasi bahan bakar DUPIC adalah properti serbuk dan jumlah produk fisi dalam bahan bakar nuklir.

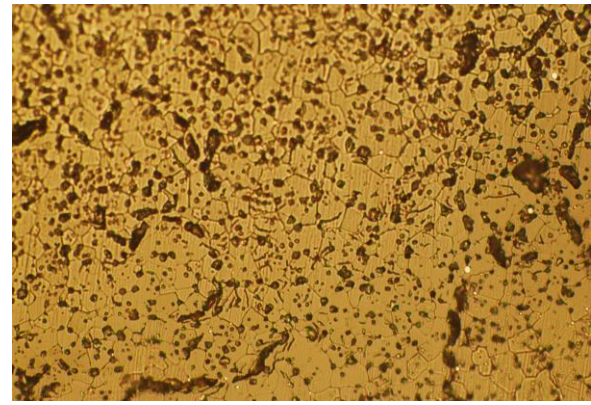
Hasil pengamatan mikrostruktur untuk pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU untuk setiap tekanan pengompakan diperlihatkan pada Gambar 3 hingga 8. Pada masing-masing gambar dapat dijelaskan bahwa semakin besar tekanan pengompakan yang digunakan memberikan mikrostruktur pelet sinter yang lebih baik. Hal tersebut disebabkan semakin besar tekanan pengompakan akan menghasilkan densitas pelet sinter semakin besar dan porositas semakin kecil. Dari hasil mikrostruktur dapat dilihat bahwa tekanan pengompakan 9 Mp menghasilkan pellet terbaik dengan sedikit porositas dan ukuran butir rata-rata 10 micron.





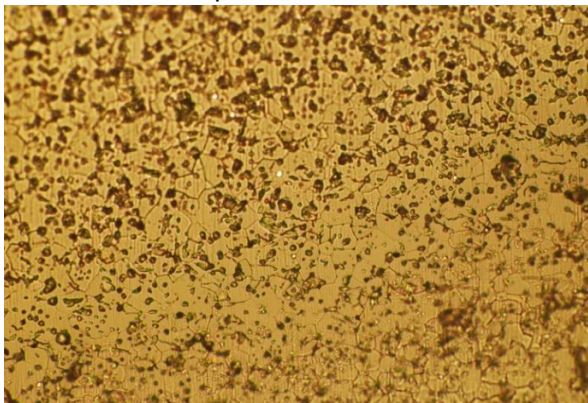
10 micron

Gambar 3. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 3 Mp



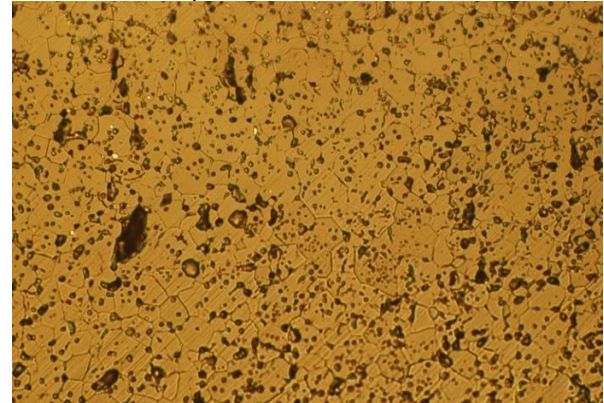
10 micron

Gambar 4. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 4 Mp



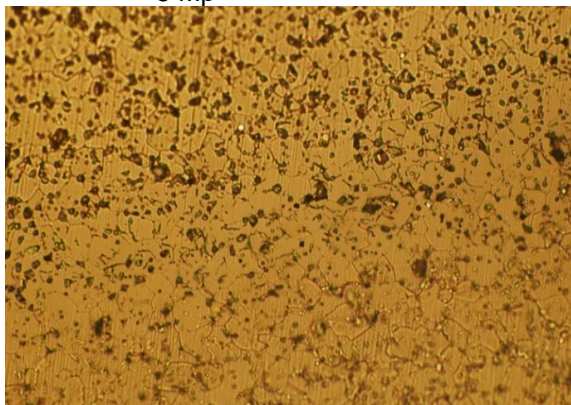
10 micron

Gambar 5. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 5 Mp



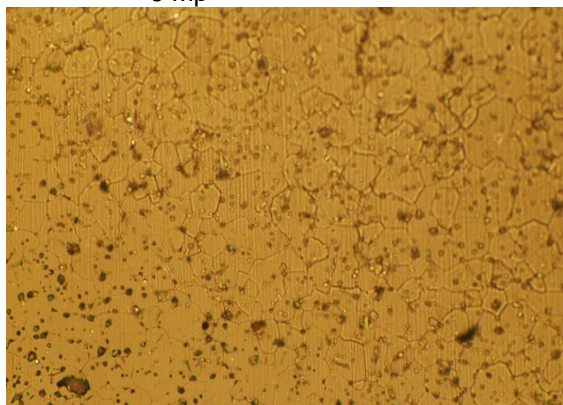
10 micron

Gambar 6. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 6 Mp



10 micron

Gambar 7. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 8 Mp



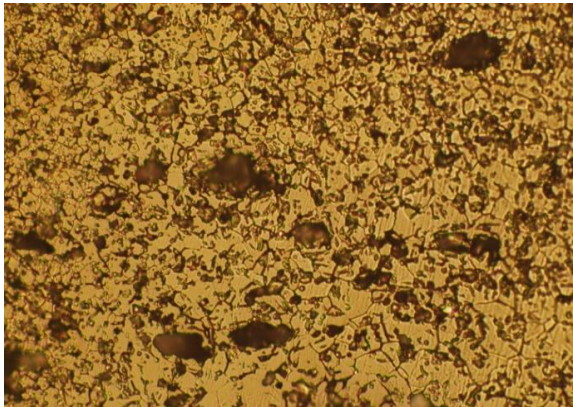
10 micron

Gambar 8. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kg tekanan kompaksi 9 Mp

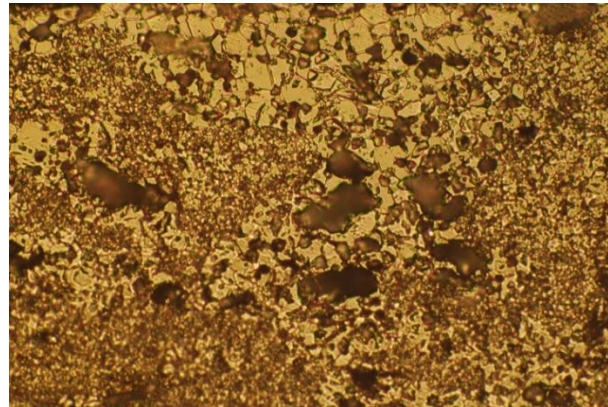


Hasil pengamatan mikrostruktur untuk pelet sinter simulasi hasil fisi *burn-up* 60 MWd/kgU untuk setiap tekanan pengepressan ditunjukkan dari Gambar 9 hingga 13. Dapat dilihat bahwa pada tekanan kompaksi yang rendah terdapat

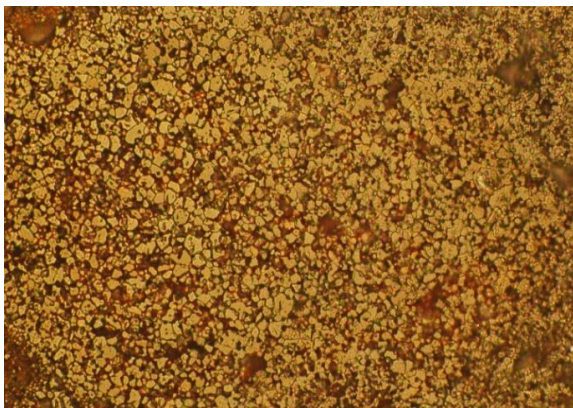
banyak porositas. Semakin besar tekanan pengompakan maka semakin sedikit porositas namun ukuran butir yang dihasilkan semakin kecil. Hal ini dimungkinkan karena pengaruh dari penambahan simulasi hasil fisi.



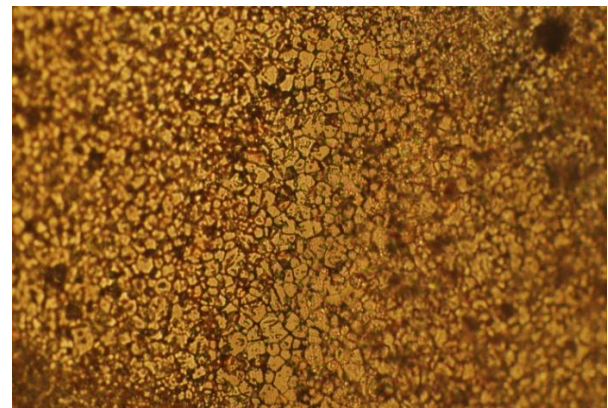
10 micron  
Gambar 9. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kg tekanan kompaksi 4 Mp



10 micron  
Gambar 10. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kg tekanan kompaksi 6 Mp

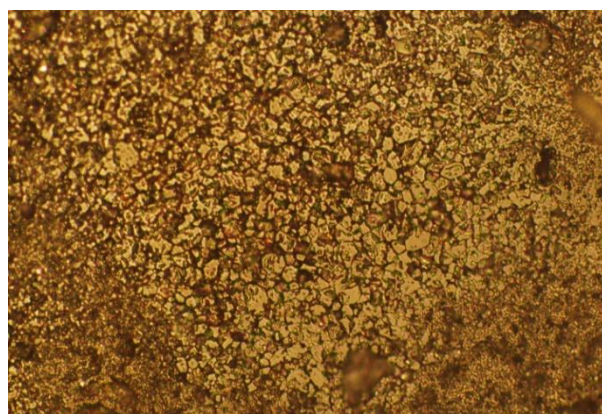


10 micron  
Gambar 11. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kg tekanan kompaksi 7 Mp.



10 micron  
Gambar 12. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kg tekanan kompaksi 8 Mp.





10 micron

Gambar 13. Mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kg tekanan kompaksi 9 Mp.

Dari hasil mikrostruktur dapat diketahui bahwa pelet sinter simulasi sangat dipengaruhi oleh penambahan jumlah bahan kimia oksida sebagai simulasi hasil fisi. Dapat dilihat bahwa semakin besar penambahan bahan kimia oksida sebagai simulasi hasil fisi menyebabkan ukuran butir semakin kecil. Dengan menambahkan tekanan pengompakan, mikrostruktur pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 60 MWd/kgU tidak menunjukkan perbaikan ukuran butir walaupun mengurangi porositas. Hasil serupa juga dilaporkan pustaka<sup>[16]</sup> bahwa ukuran butir pelet sinter semakin kecil dengan semakin besar kandungan pengotor.

## SIMPULAN

Hasil pengukuran *bulk density* untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU adalah 1,0250 g/cm<sup>3</sup> dan 1,3410 g/cm<sup>3</sup>. Hasil pengukuran *tap density* untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU adalah 1,9330 g/cm<sup>3</sup> dan 2,0443 g/cm<sup>3</sup>. Hasil pengukuran rasio O/U untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU adalah 2,0319 dan 2,0381. Hasil

pengukuran *surface area* untuk serbuk simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU dan *burn-up* 60 MWd/kgU adalah 0,8751 m<sup>2</sup>/g dan 2,6688 m<sup>2</sup>/g. Semakin besarnya *burn-up* maka akan semakin besar *tap density*, *bulk density* dan *surface area*. Densitas tertinggi pelet sinter simulasi hasil fisi dengan *burn-up* 40 MWd/kgU maupun *burn-up* 60 MWd/kgU pada tekanan pengompakan 9 Mp yaitu sebesar 9,9959 g/cm<sup>3</sup> dan 9,5490 g/cm<sup>3</sup>. Dari hasil pengamatan mikrostruktur diperoleh kesimpulan semakin besar *burn-up* menyebabkan semakin kecil ukuran butir pelet sinter.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Yth. Bpk. Prof. Sigit dan Bpk. Ir. Bambang Herutomo yang telah memberikan banyak bimbingan selama penelitian. Penulis juga mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya pada Tim Penelitian Pengembangan Teknologi Proses DUPIC antara lain saudara : Agus Sartono D.S. A.Md, Mugiyono A.Md, Ade Mahpudin, Triarjo S.ST, Suyoto S.ST, Iwan Setiawan ST, Yatno DAS, M.M. Lilis Windaryati, Mu'nisatun Sholichah S.ST, Banawa Sri Galuh A.Md, Mujinem A.Md, Ngatijo A.Md,

Isfandi A.Md, Slamet Pribadi A.Md, Rahmiati, Nining Sumarni, Erry Wahyuningsih SE, Sri Wahyuningsih S.ST. rekan-rekan BK, rekan-rekan BOSP dan semua pihak yang telah membantu kelancaran dan keberhasilan kegiatan penelitian ini.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Yongsoo Kim, Jinyoung Min. (1999). Etching Reaction of  $UO_2$  with  $CF_4/O_2$  Mixture Gas Plasma. *Journal of the Korean Nuclear Society*, Volume 31, Number 2, pp.133-138.
- [2]. Myung Seung Yang, Hangbok Choi, Chang Joon Jeong, Kee Chan Song, Jung Won Lee, Geun Il Park, Ho Dong Kim, Won Il Ko, Jang Jin Park, Ki Ho Kim, Ho Hee Lee, Joo Hwan Park. (2006). The Status and Prospect of DUPIC Fuel Technology. *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 38, No. 4.
- [3]. Chang Joon Jeong, Masood Iqbal, Gyu Hong Roh. (2002). Recycling of High Burnup Spent PWR Fuel in CANDU Reactors. *PHYSOR 2002*, Seoul, Korea, October 7-10.
- [4]. Jewhan Lee, Jeong Ik Lee, Won Joon Chang, Soon-Heung Chang. (2010). Comparative Cost Analysis of Direct Disposal Versus Pyro-processing with DUPIC in Korea. *Annals of Nuclear Energy* 37, pp.1699-1704.
- [5]. Ho Jin Ryu, Kee Chan Song, Geun Il Park, Jung Won Lee, Myung Seung Yang. (2005). Remote Fabrication and Irradiation Test of Recycled Nuclear Fuel Prepared by The Oxidation and Reduction of Spent Oxide Fuel. *Journal of Physics and Chemistry Solids* 66, pp. 671 – 674.
- [6]. Jee Won Park. (1999). A Subchannel Analysis of DUPIC Fuel Bundle for The CANDU Reactor. *Annals of Nuclear Energy* 26, pp. 29-46.
- [7]. Sigit, Noor Yudhi, Rahmat Pratomo, R. Didiék Herhady. (2005). Karakterisasi Hasil Proses Oksidasi-Reduksi Siklus I Uranium Oksida. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Yogyakarta.
- [8]. Sigit, Noor Yudhi, Rahmat Pratomo, R. Didiék Herhady. (2006). Pengaruh Suhu dan Waktu Terhadap Konsentrasi, Rasio O/U dan Efisiensi pada Proses Oksidasi-Reduksi Bahan Bakar Nuklir, *Prosiding PPI-PDITN*, Yogyakarta.
- [9]. Tae Joon Lee. (2004). Technological Change of Nuclear Fuel Cycle in Korea: The case of DUPIC. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 45, No. 1, pp. 87-104.
- [10]. Per Hogselius. (2009). Spent Nuclear Fuel Policies in Historical Perspective: An International Comparison. *Energy Policy* 37, pp. 254 – 263.
- [11]. IAEA – TECDOC – 1434. (2004). Methodology for the Assessment of Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles. Report of Phase 1B (first part) of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), Austria.
- [12]. Chang Heon Lee, Moo Yul Suh, Kwang Soon Choi, Jung Suk Kim, Yeong Jae Park, Won Ho Kim. (2003). Determination of Ru, Rh, Pd, Te, Mo and Zr in Spent Pressurized Water Reactor Fuels by Ion Exchange and Extraction Chromatographic Separations and Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometric Analysis. *Analytica Chimica Acta* 475, pp. 171-179.
- [13]. K.H. Kang, S.H. Na, K.C. Song, S.H. Lee, S.W. Kim. (2007). Oxidation

- Behavior of The Simulated Fuel with Dissolved Fission Products in Air at 573-873 K. *Thermochemica Acta* 455, pp. 129-133.
- [14]. Randall M. German. (1994). *Powder Metallurgy Science – 2<sup>nd</sup> ed.*
- [15]. J.M. Shin, J.J. Park, K.C. Song, J.H. Kim. (2009). Trapping Behavior of Gaseous Cesium by Fly Ash Filters, *Applied Radiation and Isotopes* 67, pp. 1534 – 1539.
- [16]. Geun Il Park, Jae Won Lee, Jung Won Lee, Young Woo Lee, Kee Chan Song. (2008). Effect of Impurities on The Microstructure of DUPIC Fuel Pellets Using The SIMFUEL Technique, *Nuclear Engineering and Technology*, Vol.40, No.3, April, pp. 191 -198.

Lampiran

Tabel 1. Komposisi simulasi bahan bakar bekas,  $UO_2$  pengkayaan  $U^{235} = 4\%$ ,  
*burn-up* 40 MWd/kgU, lama penyimpanan 5 tahun

No.	BAHAN	Prosentase
1	$UO_2$	96,8079
2	SrO	0,1095
3	$Y_2O_3$	0,0646
4	$ZrO_2$	0,4947
5	$MoO_2$	0,4155
6	$RuO_2$	0,2123
7	$Rh_2O_3$	0,0474
8	PdO	0,0682
9	$TeO_2$	0,0424
10	BaO	0,1560
11	$La_2O_3$	0,1330
12	$CeO_2$	0,2743
13	$Pr_6O_{11}$	0,1263
14	$Nd_2O_3$	0,4456
15	$Sm_2O_3$	0,0766
16	CdO	0,0026
17	$Eu_2O_3$	0,0121
18	$Gd_2O_3$	0,0032
19	$Sb_2O_3$	0,1031
20	Zn stearat	0,4047
<b>Total</b>		100,0000

Tabel 2. Komposisi simulasi bahan bakar bekas,  $UO_2$  pengkayaan  $U^{235} = 4\%$ ,  
*burn-up* 60 MWd/kgU, Lama penyimpanan 5 tahun

No.	Bahan	Prosentase
1	$UO_2$	94,4158
2	SrO	0,1269
3	$Y_2O_3$	0,1511
4	$ZrO_2$	0,5939
5	$MoO_2$	0,5822
6	$RuO_2$	0,2897
7	$Rh_2O_3$	0,1077
8	PdO	0,1347
9	$TeO_2$	0,0574
10	BaO	0,1986
11	$La_2O_3$	0,3246
12	$CeO_2$	0,3450
13	$Pr_6O_{11}$	0,9269
14	$Nd_2O_3$	1,1082
15	$Sm_2O_3$	0,1787
16	CdO	0,0012
17	$Eu_2O_3$	0,0390
18	$Gd_2O_3$	0,0025
19	$Sb_2O_3$	0,0174
20	Zn stearat	0,3984
<b>Total</b>		100,0000