

---

## PERBANDINGAN DENSITAS PELET UO<sub>2</sub> HASIL PELETISASI MENGGUNAKAN SERBUK DAN MIKROSPIR

**Etty Mutiara, Meniek Rachmawati, Masrukan**  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN  
Kawasan Puspiptek, Serpong, Tangerang Selatan, 15314  
e-mail: emutiara@batan.go.id

(Naskah diterima : 18-12-2015, Naskah direvisi: 08-01-2016, Naskah disetujui: 19-01-2016)

### ABSTRAK

**PERBANDINGAN DENSITAS PELET UO<sub>2</sub> HASIL PELETISASI MENGGUNAKAN SERBUK DAN MIKROSPIR UO<sub>2</sub>.** Telah dilakukan pengembangan proses peletisasi menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub> sebagai pengganti serbuk UO<sub>2</sub>. Mikrospir bersifat speris, *free flowing*, porus dengan kekerasan tertentu (*soft particle*). Keunggulan penggunaan mikrospir pada proses peletisasi adalah tidak menimbulkan debu saat kompaksi dan lebih efektif dalam pengepakan sehingga tidak membutuhkan proses granulasi dan pelumas padat. Dihipotesakan bahwa penggunaan mikrospir UO<sub>2</sub> dalam proses peletisasi akan memberikan densitas pelet sinter yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan serbuk UO<sub>2</sub> pada parameter proses peletisasi yang sama. Mikrospir UO<sub>2</sub> yang digunakan pada peletisasi ini berukuran 900 µm dan *crushing strength* 2,0 N/partikel, sedangkan serbuk UO<sub>2</sub> yang digunakan berukuran antara 150-850 µm. Proses peletisasi mikrospir UO<sub>2</sub> dan serbuk UO<sub>2</sub> dilakukan dengan memvariasikan tekanan kompaksi antara 200 Mpa hingga 500 MPa dan disinter pada temperatur 1100 °C selama 6 jam dalam suasana campuran gas hidrogen dan nitrogen. Karakterisasi dilakukan pada pelet mentah dan pelet sinter mikrospir UO<sub>2</sub> dan serbuk UO<sub>2</sub> yang meliputi pengukuran dimensi, penimbangan berat dan pengukuran densitas. Pada variasi tekanan kompaksi diperoleh pelet mentah dan pelet sinter mikrospir UO<sub>2</sub> dengan densitas lebih tinggi dibandingkan hasil peletisasi serbuk UO<sub>2</sub>. Diperoleh hasil bahwa densitas pelet mentah baik hasil kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> maupun mikrospir UO<sub>2</sub> meningkat dengan bertambahnya tekanan kompaksi. Densitas pelet mentah mikrospir UO<sub>2</sub> berkisar antara 82,1 - 84,2 %TD. Pada kondisi penyinteran yang sama, baik kompakan serbuk UO<sub>2</sub> maupun kompakan mikrospir UO<sub>2</sub> memperlihatkan densitas meningkat dengan semakin besar tekanan proses kompaksi. Dari penelitian ini belum diperoleh pelet sinter UO<sub>2</sub> dengan densitas sesuai persyaratan reaktor pengguna sehingga diperlukan penelitian lanjutan terkait parameter proses peletisasi dan spesifikasi mikrospir UO<sub>2</sub> yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO<sub>2</sub> dengan densitas sesuai persyaratan.

**Kata kunci:** peletisasi, UO<sub>2</sub>, mikrospir, serbuk, densitas.

---

## ABSTRACT

**A COMPARISON OF PELLETS DENSITIES IN PELLETIZATION PROCESS USING  $UO_2$  POWDER AND  $UO_2$  MICROSPHERE.** A pelletization process  $UO_2$  fuel has been developed using  $UO_2$  microsphere as a substitute of  $UO_2$  powder. Microspheres are spherical, free flowing and porous with certain hardness (soft particle). The benefit of using microsphere in pelletization process is dust free in compaction and more effective in packing so the granulation process and solid lubricants are not required. It is hypothesized that the use of  $UO_2$  microsphere in the pelletization process will provide higher sintered pellet density than  $UO_2$  powder at the same pelletization process parameters.  $UO_2$  microsphere size used in this pelletization was 900  $\mu m$  with crushing strength of 2.0 N / particles while the  $UO_2$  powder size between 150 and 850  $\mu m$ . The pelletization processes of  $UO_2$  microsphere and  $UO_2$  powder were performed by varying the compacting pressure between 200Mpa up to 500MPa and sintered at temperatures of 1100 °C for 6 hours in an atmosphere of hydrogen and nitrogen gas mixture. Characterizations performed on the green and sintered pellets of  $UO_2$  microsphere and  $UO_2$  powder were dimension measurements, weighing and densities measurements. The densities of green and sintered pellets of  $UO_2$  microsphere were higher than the green and sintered pellets densities of  $UO_2$  powder with corresponded compaction pressure variations. The results indicate that the density of the green pellets both compaction results  $UO_2$  powder and  $UO_2$  mikrospir increased with increasing compacting pressure. Mikrospir  $UO_2$  pellets density crude ranged from 82.1 to 84.2% TD. At the same sintering conditions, both Compaction  $UO_2$  powder and  $UO_2$  mikrospir Compaction shows the density increases with the greater pressure compacting process. The sintered pellets densities of  $UO_2$  obtained from this research were not appropriate with density requirements of PWR fuel. It is necessary to perform advanced research related to the effective pelletization process parameters and  $UO_2$  microsphere specifications in providing the appropriate sintered pellets densities.

**Keywords:** pelletization,  $UO_2$  microsphere, powder, density

## PENDAHULUAN

Pelet UO<sub>2</sub> sebagai bahan bakar PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) berpendingin air terus dikembangkan dalam rangka meningkatkan kinerjanya melalui peningkatan *burn-up* (derajat bakar)<sup>[1-3]</sup>. Peningkatan *burn-up* pelet UO<sub>2</sub> akan menurunkan kebutuhan bahan bakar baru per energi yang dihasilkan sehingga pengoperasian PLTN lebih ekonomis<sup>[1,4]</sup>. Bahan bakar dengan *burn-up* tinggi mempunyai siklus bahan bakar dalam PLTN yang lebih panjang<sup>[1,3]</sup>. Hal ini menuntut peningkatan kehandalan bahan bakar UO<sub>2</sub> agar PLTN dapat beroperasi dengan aman, selamat dan berkinerja tinggi<sup>[5]</sup>.

Upaya yang dilakukan untuk memenuhi tuntutan di atas antara lain melalui fabrikasi pelet UO<sub>2</sub> berbentuk annular<sup>[6]</sup> dan pemberian dopan<sup>[2,7-8]</sup> untuk meningkatkan konduktivitas termal, fabrikasi pelet UO<sub>2</sub> dengan jumlah pori tertutup dengan ukuran tertentu untuk meminimalkan pelepasan gas hasil fisi dan mengakomodasi *swelling*<sup>[9-11]</sup>. Segala upaya untuk peningkatan kehandalan pelet UO<sub>2</sub> yang dilakukan tetapi kemampuan pencapaian densitas yang dipersyaratkan oleh reaktor pengguna wajib dipertahankan<sup>[2,12]</sup>.

Pelet UO<sub>2</sub> untuk PLTN tipe PWR (*Power Water Reactor*) dengan densitas antara 94-96% TD (*true density*) umumnya diperoleh melalui proses peletisasi konvensional yang terdiri dari proses kompaksi dingin serbuk UO<sub>2</sub> dan proses penyinteran pelet UO<sub>2</sub> mentah. Pada proses kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> dibutuhkan pengungkungan untuk melindungi pekerja dari *radiotoxic dust hazard* yang ditimbulkan<sup>[9-11,13]</sup>. Selain itu, ukuran serbuk UO<sub>2</sub> dari jalur ADU (Amonium diuranat) diperoleh berukuran halus dan bersifat menggumpal (*non free flowing*) sehingga membutuhkan proses untuk membuat bentuk *granular* sebelum dilakukan kompaksi akhir<sup>[9,14]</sup>. Disamping itu, proses penyinteran pelet UO<sub>2</sub>

pun memerlukan pemanasan pada temperatur tinggi sekitar 1700 °C untuk memperoleh pelet UO<sub>2</sub> dengan densitas tertentu sesuai persyaratan sebagai bahan bakar.

Permasalahan yang terjadi pada proses peletisasi konvensional dapat diatasi/diperbaiki dengan menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub> sebagai pengganti serbuk UO<sub>2</sub>. Mikrospir umumnya berbentuk bulat dengan ukuran seragam, dan memiliki kekerasan permukaan partikel<sup>[9,14]</sup> tertentu, bersifat *free flowing* dan tidak menimbulkan debu saat dikompaksi<sup>[9,11,14-15]</sup>. Hal ini bisa menguntungkan karena dapat meniadakan atau tanpa proses granulasi dan kebutuhan pengungkungan untuk penanganan debu saat kompaksi. Selain itu, proses penyinteran pelet hasil kompaksi mikrospir dapat dilakukan pada temperatur lebih rendah dibanding proses penyinteran pelet hasil kompaksi serbuk UO<sub>2</sub><sup>[16]</sup>.

Penggunaan mikrospir UO<sub>2</sub> dapat meningkatkan derajat homogenitas mikro (*micro-homogeneity*) pelet UO<sub>2</sub> dengan memberikan komposisi relatif sama di setiap bagian pelet dan pori tertutup yang terdistribusi merata dalam pelet sinter<sup>[9,11,15,17]</sup>. Homogenitas ini sangat dibutuhkan terutama saat peletisasi menggunakan campuran oksida atau peletisasi serbuk UO<sub>2</sub> dengan penambahan dopan. Pelet UO<sub>2</sub> dengan komposisi yang seragam dan distribusi pori tertutup yang merata akan memberikan kemampuan pengungkungan gas hasil fisi yang merata di seluruh bagian pelet dan dapat mengakomodasi *swelling* pelet saat diiradiasi<sup>[9-10]</sup>. Kelebihan ini dapat dicapai dengan melakukan proses peletisasi menggunakan mikrospir yang porus<sup>[16]</sup> dengan *particle crushing strength* yang rendah (*soft particle*)<sup>[9,11,14]</sup>. Pada peletisasi konvensional, derajat homogenitas mikro (*micro-homogeneity*) pelet UO<sub>2</sub> yang tinggi dapat dicapai melalui proses *ball milling* dengan durasi yang panjang sebelum

serbuk campuran oksida dikompaksi<sup>[15]</sup>. Proses *ball milling* dan membuat bentuk *granular* akan memperpanjang alur proses kompaksi serbuk, sedangkan proses granulasi tidak diperlukan pada proses peletisasi menggunakan mikrospir<sup>[9,11]</sup>.

Mikrospir memiliki ukuran butir atau partikel yang relatif sama dan tidak mempunyai distribusi ukuran butir. Bila ditinjau dari sisi cara pengepakan partikel, maka partikel dengan distribusi ukuran tertentu (serbuk) akan memberikan kerapatan lebih tinggi dibandingkan dengan partikel yang berukuran seragam. Pada saat dikenai tekanan, partikel dengan ukuran lebih halus akan bergerak mengisi ruang kosong antar partikel dengan ukuran yang lebih besar sehingga pengepakan menjadi lebih rapat. Hal ini dapat dikompensasi dengan sifat mikrospir yang porus dan *brittle* akibat telah mengalami perlakuan panas atau kalsinasi. Dengan menggunakan tekanan kompaksi tertentu, mikrospir yang bersifat porus dan *brittle* serta berukuran seragam diduga akan terfragmentasi lebih lanjut dengan mekanisme tertentu sehingga berukuran lebih halus dengan distribusi tertentu yang menjadikan pengepakan mikrospir terfragmentasi lebih rapat. Dengan demikian proses kompaksi mikrospir yang porus dan memiliki *crushing strength* yang rendah (*soft particles*) akan memberikan densitas kompakan yang tinggi<sup>[9,11,14]</sup>. Mikrospir yang keras dan non-porus (densitas tinggi) kurang baik untuk kompaksi karena akan menurunkan interlok mekanik antar mikrospir sehingga densitas pelet mentah yang diperoleh lebih rendah<sup>[11,18]</sup>. Selain itu bentuk speris dari mikrospir akan memberikan *flow ability* yang tinggi<sup>[9,11,15]</sup>, sehingga kompaksi mikrospir tidak membutuhkan lagi pelumas padat untuk mengatasi friksi antar partikel yang besar dalam rangka memperoleh densitas yang tinggi dan merata di sepanjang pelet. Dengan kata lain, mikrospir yang bulat dan porus dengan densitas rendah serta memiliki *crushing strength* yang rendah (*soft particles*) dan akan meningkatkan

kompatibilitas serta kompresibilitas saat mikrospir dikenakan proses kompaksi.

Pada proses penyinteran, luas permukaan partikel yang besar merupakan *driving force* untuk laju difusi yang tinggi sehingga akan diperoleh pelet sinter dengan densitas yang tinggi. Serbuk yang memiliki mampu sinter yang baik adalah serbuk yang tersusun dari partikel yang agak lunak (*fairly soft particles*) dengan ukuran yang sangat halus dan mempunyai luas permukaan partikel yang relatif besar<sup>[19]</sup>. Mikrospir dimungkinkan untuk memiliki ukuran partikel lebih besar dibandingkan dengan serbuk, dapat bersifat porus dan rapuh atau *brittle* tergantung pada proses pembuatannya. Mikrospir yang porus, *brittle* dan memiliki *crushing strength* yang rendah (*soft particles*) dapat memberikan densitas pelet sinter yang tinggi<sup>[9,14]</sup> karena luas permukaan partikel yang besar hasil fragmentasi pada saat kompaksi akan mendominasi dalam peningkatan laju difusi saat penyinteran. Hasil penelitian menyatakan bahwa pelet sinter hasil kompaksi mikrospir UO<sub>2</sub> memiliki densitas antara 85 – 94% TD yang diperoleh dengan proses penyinteran pada temperatur 1400 °C selama 6 jam<sup>[11]</sup>, sedangkan untuk densitas 96% TD diperoleh melalui proses penyinteran pada temperatur 1600 °C selama 4 jam<sup>[9]</sup> atau 1350 °C selama 2 jam sampai 4 jam<sup>[14]</sup>.

Penelitian ini merupakan pendekatan awal dalam mengelaborasi proses peletisasi menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub> jika dibandingkan dengan proses peletisasi serbuk UO<sub>2</sub>. Proses peletisasi menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub> dihipotesakan akan memberikan pelet mentah dan pelet sinter UO<sub>2</sub> dengan densitas yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan serbuk UO<sub>2</sub>. Untuk membuktikan hipotesa penelitian di atas, maka dilakukan kompaksi dengan variasi tekanan kompaksi baik terhadap mikrospir UO<sub>2</sub> maupun serbuk UO<sub>2</sub> dan disinter pada kondisi penyinteran yang konstan. Tekanan kompaksi divariasikan

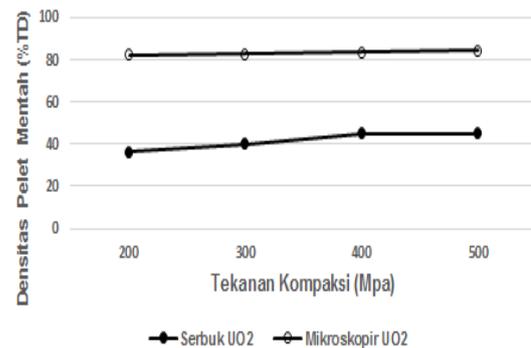
antara 200MPa hingga 500Mpa dan pelaksanaan proses penyinteran dilakukan pada temperatur 1100 °C selama 6 jam<sup>[13]</sup> dalam media gas campuran N<sub>2</sub> dan H<sub>2</sub>. Densitas pelet mentah dan pelet sinter diukur untuk memperoleh informasi tentang peningkatan kerapatan atau densitas pelet hasil proses peletisasi menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub>. Dari penelitian ini diharapkan diperoleh alternatif proses peletisasi dengan alur proses yang lebih pendek dan lebih aman yang akan menurunkan *production cost* dan menaikkan *production rate* dalam penyediaan pelet UO<sub>2</sub> untuk memenuhi persyaratan reaktor pengguna.

## METODOLOGI

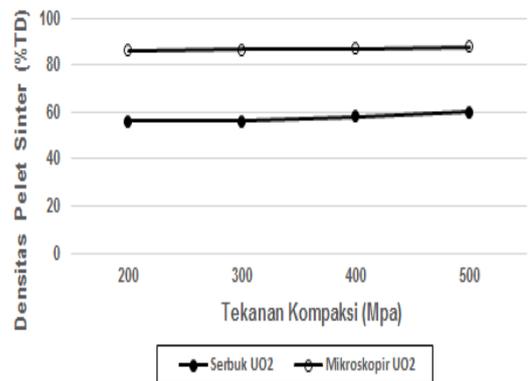
Pabrikasi pelet UO<sub>2</sub> dilakukan dengan menggunakan serbuk UO<sub>2</sub> alam dan mikrospir UO<sub>2</sub> alam. Serbuk UO<sub>2</sub> yang digunakan mempunyai distribusi ukuran antara 75 – 850 µm. Mikrospir UO<sub>2</sub> yang digunakan adalah mikrospir hasil perlakuan panas atau kalsinasi dengan ukuran rata-rata sekitar 900 µm dan *crushing strength* 2,0 N/partikel. Proses kompaksi dilakukan dengan variasi tekanan 200, 300, 400 dan 500MPa menggunakan mesin kompaksi *Komage (ME-02)*. Pelet mentah UO<sub>2</sub> selanjutnya disinter pada temperatur 1100 °C selama 6 jam menggunakan tungku kalsinasi reduksi. Media penyinteran yang digunakan adalah campuran gas N<sub>2</sub> dan gas H<sub>2</sub>. Selanjutnya dilakukan karakterisasi pelet sinter UO<sub>2</sub> yang meliputi pengukuran dimensi, penimbangan berat dan perhitungan densitas. Data dimensi pelet diperoleh dengan cara mengukur tinggi dan diameter pelet menggunakan jangka sorong. Perhitungan densitas pelet diperoleh dengan cara membagi hasil pengukuran berat pelet menggunakan timbangan analitik dengan hasil perhitungan volume berdasarkan pengukuran dimensi.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Densitas pelet mentah UO<sub>2</sub> hasil pabrikasi serbuk UO<sub>2</sub> dan mikrospir UO<sub>2</sub> dengan variasi tekanan kompaksi ditunjukkan oleh Gambar 1, sedangkan densitas pelet sinter keduanya ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Densitas pelet mentah serbuk UO<sub>2</sub> dan pelet mentah mikrospir UO<sub>2</sub> variasi tekanan kompaksi



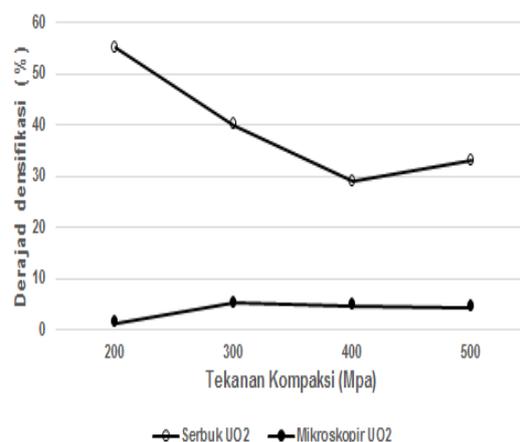
Gambar 2. Densitas pelet sinter serbuk UO<sub>2</sub> dan pelet sinter mikrospir UO<sub>2</sub> variasi tekanan kompaksi

Gambar 1 memperlihatkan bahwa densitas pelet mentah baik hasil kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> maupun mikrospir UO<sub>2</sub> meningkat dengan bertambahnya tekanan kompaksi. Densitas pelet mentah mikrospir UO<sub>2</sub> diperoleh berkisar antara 82,1 - 84,2% TD. Densitas ini sangat tinggi bila dibandingkan dengan densitas pelet mentah hasil kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> pada tekanan kompaksi yang sama. Densitas tertinggi yang dapat dicapai pada kompaksi serbuk UO<sub>2</sub> adalah antara 36 – 45% TD. Bentuk spheris dari mikrospir UO<sub>2</sub> akan memberikan

*flow ability* yang tinggi. Hal ini berkontribusi dalam minimalisasi besar friksi antar partikel pada tahap awal proses kompaksi dan mempersingkat waktu yang dibutuhkan untuk proses pengepakan mikrospir dalam cetakan bila dibandingkan dengan serbuk  $UO_2$  yang cenderung menggumpal atau mengaglomerasi. Selain itu, diperkirakan telah terjadi fragmentasi lebih lanjut pada mikrospir  $UO_2$  pada saat kompaksi. Dengan tekanan kompaksi tertentu, mikrospir yang porus dan rapuh atau *brittle* akibat telah mengalami proses kalsinasi akan terfragmentasi sehingga berukuran lebih halus dengan distribusi tertentu yang menyebabkan pengepakan mikrospir terfragmentasi menjadi lebih rapat sehingga diperoleh densitas kompakan menjadi lebih tinggi<sup>[16]</sup>. Tingkat keporusan dan kerapuhan mikrospir sangat menentukan keberhasilan proses kompaksi mikrospir<sup>[9,11,14-15]</sup>. Peningkatan *crushing strength* pada mikrospir (mikrospir semakin tidak rapuh) menyebabkan mekanikal *interlock* antar partikel menjadi lebih rendah (tidak saling kunci) dan tidak terjadi fragmentasi sehingga menyebabkan densitas pelet mentah menjadi lebih rendah<sup>[18]</sup>. Pada penelitian ini dapat dikatakan bahwa mikrospir  $UO_2$  dengan karakteristik tertentu mempunyai kompresibilitas lebih tinggi dibanding serbuk  $UO_2$  pada setiap variasi tekanan kompaksi yang digunakan.

Gambar 2 memperlihatkan densitas pelet sinter kompakan serbuk  $UO_2$  dan kompakan mikrospir  $UO_2$  dengan variasi tekanan kompaksi. Pada kondisi penyinteran yang sama, baik kompakan serbuk  $UO_2$  maupun kompakan mikrospir  $UO_2$  memperlihatkan bahwa densitas meningkat dengan semakin besar tekanan proses kompaksi. Pada proses penyinteran, luas permukaan partikel yang besar merupakan *driving force* untuk laju difusi yang tinggi sehingga akan diperoleh pelet sinter dengan densitas yang tinggi. Serbuk yang memiliki mampu sinter yang baik adalah serbuk yang tersusun dari

partikel yang agak lunak (*fairly soft particles*) dengan ukuran yang sangat halus yang mempunyai luas permukaan partikel yang besar<sup>[19]</sup>. Pada saat proses penyinteran diperkirakan ada beberapa hal yang berkemungkinan terjadi. Pertama adalah bila ditinjau dari kontribusi dari keras lunaknya partikel penyusun pelet terhadap densitas pelet sinter. Serbuk  $UO_2$  kemungkinan tersusun dari partikel yang lebih lunak dibandingkan partikel hasil fragmentasi mikrospir  $UO_2$  yang porus dan rapuh. Dengan demikian *driving force* proses difusi untuk densifikasi pada saat penyinteran kompakan serbuk  $UO_2$  lebih tinggi dari kompakan mikrospir. Hal ini dapat dilihat dari derajat densifikasi (*shrinkage*) pelet sinter mikrospir yang lebih rendah dibanding pelet sinter serbuk sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Derajat densifikasi pelet sinter serbuk  $UO_2$  dan pelet sinter mikrospir  $UO_2$  variasi tekanan kompaksi

Namun, hal ini dikompensasi oleh luas permukaan yang besar karena tersusun dari partikel yang berukuran sangat halus hasil fragmentasi lebih lanjut pada mikrospir  $UO_2$  yang porus dan rapuh. Luas permukaan yang besar pada pelet mikrospir memberikan laju difusi yang tinggi sebagai *driving force* untuk perolehan densitas pelet sinter yang lebih tinggi dibandingkan pelet sinter serbuk. Selain itu terjadi juga kompetisi antara luas permukaan sebagai

*driving force* laju difusi dengan densitas pelet mentah yang sudah tinggi sebagai penghalang difusi lebih lanjut dalam proses penyinteran kompak mikrospir UO<sub>2</sub>. Hal ini menyebabkan derajat atau tingkat densifikasi pelet sinter mikrospir UO<sub>2</sub> tidak tinggi.

Baik menggunakan serbuk UO<sub>2</sub> maupun mikrospir UO<sub>2</sub> dalam proses peletisasi, densitas pelet sinter UO<sub>2</sub> yang diperoleh pada penelitian ini masih belum memenuhi persyaratan densitas bahan bakar untuk reaktor pengguna. Gambar 1 sampai dengan Gambar 3 memperlihatkan bahwa hasil kompetisi dari beberapa faktor terkait sifat serbuk dan sifat mikrospir yang mempengaruhi proses kompaksi dan penyinteran pelet UO<sub>2</sub> dalam pencapaian densitas yang tinggi. Kendati demikian, mikrospir UO<sub>2</sub> telah memperlihatkan *trend* yang menunjukkan beberapa keunggulan dibanding serbuk UO<sub>2</sub> dalam proses peletisasi. Untuk itu, akan dilakukan pengembangan lebih lanjut terkait parameter proses peletisasi dan spesifikasi mikrospir UO<sub>2</sub> yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO<sub>2</sub> dengan densitas sesuai persyaratan reaktor pengguna.

## SIMPULAN

Proses kompaksi menggunakan mikrospir UO<sub>2</sub> yang bersifat *free flowing* tidak membutuhkan tambahan pelumas padat dan mampu memberikan densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan serbuk UO<sub>2</sub>. Diduga telah terjadi proses fragmentasi pada mikrospir UO<sub>2</sub> selama proses kompaksi dengan mekanisme tertentu sehingga mikrospir UO<sub>2</sub> yang terfragmentasi akan berukuran lebih halus dengan distribusi tertentu dan menjadikan pengepakan mikrospir terfragmentasi lebih rapat. Tekanan kompaksi sebesar 500MPa memberikan densitas pelet mentah tertinggi yaitu sebesar 84,2% TD. Hasil dari fragmentasi pada saat kompaksi mikrospir UO<sub>2</sub> dapat meningkatkan laju

difusi proses penyinteran karena memberikan luas permukaan yang tinggi dan sistem pengepakan yang lebih efektif dibandingkan dengan penyinteran pelet dari serbuk UO<sub>2</sub>. Masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait spesifikasi mikrospir UO<sub>2</sub> dan parameter proses peletisasi yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO<sub>2</sub> dengan densitas yang lebih baik.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ka.PTBBN – BATAN dan seluruh staf yang telah berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Saji, E. et al (2009). *Development of Advanced PWR Fuel and Core for High Reliability and Performance*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 46, No. 4, 29 -34.
- [2] Dooies, B.J. (2008). *Enhancement of Uranium Dioxide Thermal and Mechanical Properties by Oxide Dopants*. Master Thesis, University of Florida.
- [3] Balakrishna, P. (2012). *ThO<sub>2</sub> and (U,Th)O<sub>2</sub> Processing*. A Review. Natural Science 4, 943 – 949.
- [4] Spino, J. et al (2012). *Bulk-Nanocrystalline Oxide Nuclear Fuels – An Innovative Material Option for Increasing Fission Gas Retention, Plasticity and Radiation Tolerance*. Journal of Nuclear Material 422, 27 – 44.
- [5] Zinkle, S.J. et al (2014). *Accident Tolerant Fuels for LWRs: A Perspective*. Journal of Nuclear Materials 448, 374 – 379.
- [6] Mozafari, M.A. et al (2013). *Design of Annular Fuels for Typical VVER-1000 Core: Neutronic Investigation, Pitch Optimization and MDNBR Calculation*. Annals of Nuclear Energy 60, 226 – 234.

- [7] Zhou, W. et al (2015). *Fabrication Methods and Thermal Hydraulics Analysis of Enhanced Thermal Conductivity  $UO_2$ -BeO Fuel in Light Water Reactor*. Annals of Nuclear Energy, 81, 240 -248.
- [8] Staicu, D. et al (2014). *Effect of Burn-up On The Thermal Conductivity of Uranium-Gadolinium Dioxide up to 100GWd/tHM*. Journal of Nuclear material 453, 259 – 269.
- [9] Kutty, P.S. et al (2013). *Fabrication of Dense  $(Th_{0.96}U_{0.04})O_2$  by Sol Gel Microsphere Pelletisation (SGMP) Route*. BARC/2013/E/001, Bhabha Atomic Research Centre, Mumbai, India.
- [10] Ganguly, C. et al (1991). *Fabrication of High Density  $UO_2$  Fuel Pellets Involving Sol-Gel Microsphere Pelletisation and Low Temperature Sintering*. Journal of Nuclear Material, 178, 179 – 183.
- [11] Remy, E. et al (2012). *Calcined Resin Microsphere Pelletization (CRMP): A Novel Process for Sintered Metallic Oxide Pellets*. Journal of the European Ceramic Society, 32, 3199 – 3209.
- [12] Song K.W., Jeon K.L., Jang Y.K., Park J.H. and Koo Y.H. (2009), "Progress In Nuclear Fuel Technology In Korea", Nuclear Engineering And Technology, Vol.41 No.4 p.493-520.
- [13] Meniek, R. et al (2013). *Research on Sol-gel Microsphere Pelletization of  $UO_2$  for PHWR Fuel in Indonesia*. IAEA Tecdoc CD 1751.
- [14] Pai, R.V. et al (2008). *Fabrication of Dense  $(Th,U)O_2$  Pellets Through Microspheres Impregnation Technique*. Journal of Nuclear Material 381, 249 – 258.
- [15] Kumar, N. et al (2006). *Preparation of  $(U, Pu)O_2$  Pellets Through Sol-Gel Microspheres Pelletization Technique*. Journal of Nuclear Material 359, 69 – 79.
- [16] Cologna, M. et al (2015). *Sub-Micrometre Grained  $UO_2$  Pellets Consolidated from Sol Gel Beads Using Spark Plasma Sintering (SPS)*. Ceramics International, ARTICLE IN PRESS.
- [17] Sokucu, A.S. et al (2014). *Study on Preparation and First-Stage Sintering Kinetics of  $ThO_2$ - $UO_2$  Pellets Made by Sol-Gel Microsphere Technique*. Acta Physica Polonica A, Vol. 127, No.4 , 987 – 991.
- [18] Ferreira, R.A.N. et al (2006). *A Model for The Behavior of Thorium Uranium Mixed Oxide Kernels in The Pelletizing Process*. Journal of Nuclear Material 350, 271 – 283.
- [19] Yulianto, T. et al (2013). *Proses Pengompakan dan Penyinteran Pelet CERMET  $UO_2$ -Zr*. Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA, Vo.19 , No.1,39–46. ISSN No. 1907-2635, Akreditasi No.416/AU2/P2MI-LIP/04/2012