
PERBANDINGAN DENSITAS PELET UO_2 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_2 HASIL PELETISASI MENGGUNAKAN SERBUK DAN MIKROSPIR UO_2 . Telah dilakukan pengembangan proses peletisasi menggunakan mikrospir UO_2 sebagai pengganti serbuk UO_2 . Mikrospir bersifat spheris, *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_2 dalam proses peletisasi akan memberikan densitas pelet sinter yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan serbuk UO_2 pada parameter proses peletisasi yang sama. Mikrospir UO_2 yang digunakan pada peletisasi ini berukuran 900 μm dan *crushing strength* 2,0 N/partikel, sedangkan serbuk UO_2 yang digunakan berukuran antara 150-850 μm . Proses peletisasi mikrospir UO_2 dan serbuk UO_2 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_2 dan serbuk UO_2 yang meliputi pengukuran dimensi, penimbangan berat dan pengukuran densitas. Pada variasi tekanan kompaksi diperoleh pelet mentah dan pelet sinter mikrospir UO_2 dengan densitas lebih tinggi dibandingkan hasil peletisasi serbuk UO_2 . Diperoleh hasil bahwa densitas pelet mentah baik hasil kompaksi serbuk UO_2 maupun mikrospir UO_2 meningkat dengan bertambahnya tekanan kompaksi. Densitas pelet mentah mikrospir UO_2 berkisar antara 82,1 - 84,2 %TD. Pada kondisi penyinteran yang sama, baik kompakan serbuk UO_2 maupun kompakan mikrospir UO_2 memperlihatkan densitas meningkat dengan semakin besar tekanan proses kompaksi. Dari penelitian ini belum diperoleh pelet sinter UO_2 dengan densitas sesuai persyaratan reaktor pengguna sehingga diperlukan penelitian lanjutan terkait parameter proses peletisasi dan spesifikasi mikrospir UO_2 yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO_2 dengan densitas sesuai persyaratan.

Kata kunci: peletisasi, UO_2 , 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 μm with crushing strength of 2.0 N / particles while the UO_2 powder size between 150 and 850 μm . 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 UO₂ sebagai bahan bakar PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir) berpendingin air terus dikembangkan dalam rangka meningkatkan kinerjanya melalui peningkatan *burn-up* (derajat bakar)^[1-3]. Peningkatan *burn-up* pelet UO₂ akan menurunkan kebutuhan bahan bakar baru per energi yang dihasilkan sehingga pengoperasian PLTN lebih ekonomis^[1,4]. Bahan bakar dengan *burn-up* tinggi mempunyai siklus bahan bakar dalam PLTN yang lebih panjang^[1,3]. Hal ini menuntut peningkatan kehandalan bahan bakar UO₂ agar PLTN dapat beroperasi dengan aman, selamat dan berkinerja tinggi^[5].

Upaya yang dilakukan untuk memenuhi tuntutan di atas antara lain melalui fabrikasi pelet UO₂ berbentuk annular^[6] dan pemberian dopan^[2,7-8] untuk meningkatkan konduktivitas termal, fabrikasi pelet UO₂ dengan jumlah pori tertutup dengan ukuran tertentu untuk meminimalkan pelepasan gas hasil fisi dan mengakomodasi *swelling*^[9-11]. Segala upaya untuk peningkatan kehandalan pelet UO₂ yang dilakukan tetapi kemampuan pencapaian densitas yang dipersyaratkan oleh reaktor pengguna wajib dipertahankan^[2,12].

Pelet UO₂ 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 UO₂ dan proses penyinteran pelet UO₂ mentah. Pada proses kompaksi serbuk UO₂ dibutuhkan pengungkungan untuk melindungi pekerja dari *radiotoxic dust hazard* yang ditimbulkan^[9-11,13]. Selain itu, ukuran serbuk UO₂ 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^[9,14]. Disamping itu, proses penyinteran pelet UO₂

pun memerlukan pemanasan pada temperatur tinggi sekitar 1700 °C untuk memperoleh pelet UO₂ dengan densitas tertentu sesuai persyaratan sebagai bahan bakar.

Permasalahan yang terjadi pada proses peletisasi konvensional dapat diatasi/diperbaiki dengan menggunakan mikrospir UO₂ sebagai pengganti serbuk UO₂. Mikrospir umumnya berbentuk bulat dengan ukuran seragam, dan memiliki kekerasan permukaan partikel^[9,14] tertentu, bersifat *free flowing* dan tidak menimbulkan debu saat dikompaksi^[9,11,14-15]. 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 UO₂^[16].

Penggunaan mikrospir UO₂ dapat meningkatkan derajat homogenitas mikro (*micro-homogeneity*) pelet UO₂ dengan memberikan komposisi relatif sama di setiap bagian pelet dan pori tertutup yang terdistribusi merata dalam pelet sinter^[9,11,15,17]. Homogenitas ini sangat dibutuhkan terutama saat peletisasi menggunakan campuran oksida atau peletisasi serbuk UO₂ dengan penambahan dopan. Pelet UO₂ 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^[9-10]. Kelebihan ini dapat dicapai dengan melakukan proses peletisasi menggunakan mikrospir yang porus^[16] dengan *particle crushing strength* yang rendah (*soft particle*)^[9,11,14]. Pada peletisasi konvensional, derajat homogenitas mikro (*micro-homogeneity*) pelet UO₂ yang tinggi dapat dicapai melalui proses *ball milling* dengan durasi yang panjang sebelum

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

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^[9,11,14]. 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^[11,18]. Selain itu bentuk speris dari mikrospir akan memberikan *flow ability* yang tinggi^[9,11,15], 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^[19]. 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^[9,14] 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_2 memiliki densitas antara 85 – 94% TD yang diperoleh dengan proses penyinteran pada temperatur 1400 °C selama 6 jam^[11], sedangkan untuk densitas 96% TD diperoleh melalui proses penyinteran pada temperatur 1600 °C selama 4 jam^[9] atau 1350 °C selama 2 jam sampai 4 jam^[14].

Penelitian ini merupakan pendekatan awal dalam mengelaborasi proses peletisasi menggunakan mikrospir UO_2 jika dibandingkan dengan proses peletisasi serbuk UO_2 . Proses peletisasi menggunakan mikrospir UO_2 dihipotesakan akan memberikan pelet mentah dan pelet sinter UO_2 dengan densitas yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan serbuk UO_2 . Untuk membuktikan hipotesa penelitian di atas, maka dilakukan kompaksi dengan variasi tekanan kompaksi baik terhadap mikrospir UO_2 maupun serbuk UO_2 dan disinter pada kondisi penyinteran yang konstan. Tekanan kompaksi divariasikan

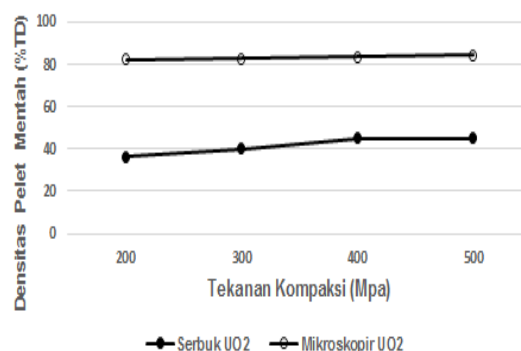
antara 200MPa hingga 500Mpa dan pelaksanaan proses penyinteran dilakukan pada temperatur 1100 °C selama 6 jam^[13] dalam media gas campuran N₂ dan H₂. Densitas pelet mentah dan pelet sinter diukur untuk memperoleh informasi tentang peningkatan kerapatan atau densitas pelet hasil proses peletisasi menggunakan mikrospir UO₂. 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 UO₂ untuk memenuhi persyaratan reaktor pengguna.

METODOLOGI

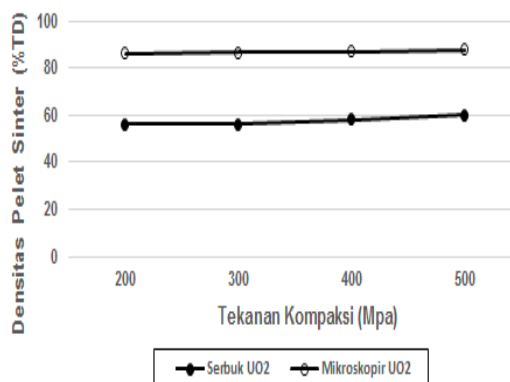
Pabrikasi pelet UO₂ dilakukan dengan menggunakan serbuk UO₂ alam dan mikrospir UO₂ alam. Serbuk UO₂ yang digunakan mempunyai distribusi ukuran antara 75 – 850 µm. Mikrospir UO₂ yang digunakan adalah mikrospir hasil perlakuan panas atau kalsinasi dengan ukuran rata-rata sekitar 900 µm dan *crushing strength* 2,0 N/partikel. Proses kompaksi dilakukan dengan variasi tekanan 200, 300, 400 dan 500MPa menggunakan mesin kompaksi *Komage (ME-02)*. Pelet mentah UO₂ selanjutnya disinter pada temperatur 1100 °C selama 6 jam menggunakan tungku kalsinasi reduksi. Media penyinteran yang digunakan adalah campuran gas N₂ dan gas H₂. Selanjutnya dilakukan karakterisasi pelet sinter UO₂ 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 UO₂ hasil pabrikasi serbuk UO₂ dan mikrospir UO₂ dengan variasi tekanan kompaksi ditunjukkan oleh Gambar 1, sedangkan densitas pelet sinter keduanya ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Densitas pelet mentah serbuk UO₂ dan pelet mentah mikrospir UO₂ variasi tekanan kompaksi



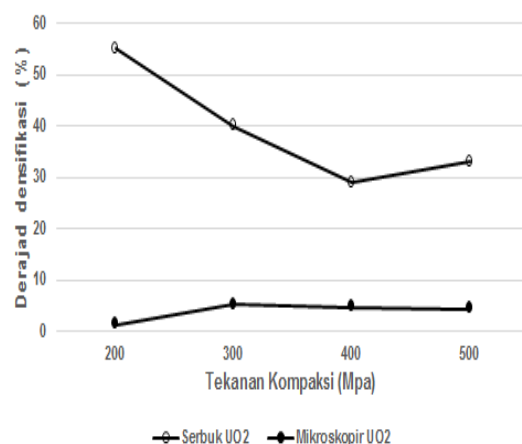
Gambar 2. Densitas pelet sinter serbuk UO₂ dan pelet sinter mikrospir UO₂ variasi tekanan kompaksi

Gambar 1 memperlihatkan bahwa densitas pelet mentah baik hasil kompaksi serbuk UO₂ maupun mikrospir UO₂ meningkat dengan bertambahnya tekanan kompaksi. Densitas pelet mentah mikrospir UO₂ diperoleh berkisar antara 82,1 - 84,2% TD. Densitas ini sangat tinggi bila dibandingkan dengan densitas pelet mentah hasil kompaksi serbuk UO₂ pada tekanan kompaksi yang sama. Densitas tertinggi yang dapat dicapai pada kompaksi serbuk UO₂ adalah antara 36 – 45% TD. Bentuk spheris dari mikrospir UO₂ 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^[16]. Tingkat keporusan dan kerapuhan mikrospir sangat menentukan keberhasilan proses kompaksi mikrospir^[9,11,14-15]. 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^[18]. 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^[19]. 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 kompakan mikrospir UO_2 . Hal ini menyebabkan derajat atau tingkat densifikasi pelet sinter mikrospir UO_2 tidak tinggi.

Baik menggunakan serbuk UO_2 maupun mikrospir UO_2 dalam proses peletisasi, densitas pelet sinter UO_2 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_2 dalam pencapaian densitas yang tinggi. Kendati demikian, mikrospir UO_2 telah memperlihatkan *trend* yang menunjukkan beberapa keunggulan dibanding serbuk UO_2 dalam proses peletisasi. Untuk itu, akan dilakukan pengembangan lebih lanjut terkait parameter proses peletisasi dan spesifikasi mikrospir UO_2 yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO_2 dengan densitas sesuai persyaratan reaktor pengguna.

SIMPULAN

Proses kompaksi menggunakan mikrospir UO_2 yang bersifat *free flowing* tidak membutuhkan tambahan pelumas padat dan mampu memberikan densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan serbuk UO_2 . Diduga telah terjadi proses fragmentasi pada mikrospir UO_2 selama proses kompaksi dengan mekanisme tertentu sehingga mikrospir UO_2 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_2 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_2 . Masih perlu dilakukan penelitian lebih lanjut terkait spesifikasi mikrospir UO_2 dan parameter proses peletisasi yang efektif dalam memberikan pelet sinter UO_2 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). *ThO₂ and (U,Th)O₂ 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