

Pengaruh penambahan dopan Cr_2O_3 pada pelet UO_2 terhadap sifat termal dan mekanik pin bahan bakar reaktor tipe PWR pasca iradiasi

Tri Yulianto⁽¹⁾, Etty Marti Wigayati⁽²⁾

(1)Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,

(2)Pusat Penelitian Fisika (P2F) LIPI,

Kawasan Puspipstek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia

e-mail : yulianto@batan.go.id

(Naskah diterima 15-04-2015 disetujui 30-06-2015)

Abstract

Effect of Cr_2O_3 dopant addition on UO_2 pellets to thermal and mechanical characteristic of post irradiation PWR fuel pin. Effect of Cr_2O_3 dopant addition on UO_2 pellets to thermal and mechanical characteristic of post irradiation PWR reactor fuel pin using FEMAXI-V computer code to UO_2 pellets of large grained pellets and larger density performance has been studied. The grain size can be adjusted by the sinter process and by additives to the dopant such as Cr_2O_3 . Results of the analysis of the effect of the addition of dopants on UO_2 pellets to a thermal process for irradiated shows the temperature pattern in the center of the pellet and the gap between pellet and cladding increases. Results of the analysis of the influence of grain size on the identified characteristics of the pellets UO_2 pellets is better than the thermal process analysis indicated the formation of fission gas products decreased grain size ranging from 6.9 μm to 15.5 μm grain size and subsequent increased fission gas products. In general, from the data obtained in this study that the grain size ranging from 6.9 μm (without dopants) to 75.4 μm showed grain size above 9.1 μm and 25.2 μm below the thermal properties of the pellets have a better and safer PRTF in terms of safety compared to without dopants. The addition of dopants optimal for the manufacture of the next pellet with grain sizes between 9.1 μm to 15.5 μm as a stuffing material that will fuel pins irradiated in the PRTF - Reaktor serba guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS)

Keywords : UO_2 pellets, Cr_2O_3 dopant, thermal properties, mechanical properties, pin

Abstrak

Pengaruh penambahan dopan Cr_2O_3 pada pelet UO_2 terhadap sifat termal dan mekanik pin bahan bakar reaktor tipe PWR pasca iradiasi. Telah dipelajari pengaruh penambahan dopan Cr_2O_3 pada pelet UO_2 terhadap sifat termal dan mekanik pin bahan bakar reaktor tipe PWR pasca iradiasi menggunakan program komputer FEMAXI-V terhadap unjuk kerja pelet UO_2 sinter berbutir besar dan densitas yang lebih besar dari hasil penelitian sebelumnya. Hasil pengaruh penambahan dopan pada pelet UO_2 terhadap proses termal selama diiradiasi menunjukkan pola temperatur pada pusat pelet dan gap antara pelet dan kelongsong meningkat. Pengaruh besar butir pada pelet teridentifikasi menunjukkan karakteristik pelet UO_2 lebih baik dan dari analisis proses termal ditunjukkan terbentuknya produk gas fisi mengalami penurunan mulai dari ukuran butir $6,9 \mu\text{m}$ sampai ukuran butir $15,5 \mu\text{m}$ dan selanjutnya produk gas fisi meningkat. Secara umum dari data yang diperoleh pada penelitian ini bahwa ukuran butir mulai dari $6,9 \mu\text{m}$ (tanpa dopan) hingga $75,4 \mu\text{m}$ menunjukkan ukuran butir diatas $9,1 \mu\text{m}$ dan dibawah $25,2 \mu\text{m}$ memiliki sifat termal pada pelet lebih baik dan aman dari segi keselamatan PRTF dibandingkan dengan tanpa dopan. Penambahan dopan optimal untuk pembuatan pelet berikutnya lebih baik dan aman dengan ukuran butir antara $9,1 \mu\text{m}$ sampai dengan $15,5 \mu\text{m}$ sebagai bahan isian pin bahan bakar yang akan diiradiasi di PRTF Reaktor RSG-GAS.

Kata kunci : pelet UO_2 , dopan Cr_2O_3 , sifat termal, sifat mekanik, pin

1. Pendahuluan

Pada saat ini perkembangan penelitian dalam rangka peningkatan fraksi bakar (*burn-up*) telah mampu mencapai 110 MWd/kg pada eksperimen di reaktor uji dengan pengembangan pelet, kelongsong dan bahan struktur lainnya^[1]. Bahan bakar *Pressurized Water Reactor* (PWR) berfraksi bakar tinggi menuntut peningkatan kehandalan bahan bakar UO_2 . Salah satu upaya untuk memenuhi tuntutan tersebut adalah dengan fabrikasi pelet UO_2 berbutir besar berukuran lebih besar dari yang saat ini digunakan yang berkisar antara $10\text{-}20 \mu\text{m}$ ^[1,2]. Peningkatan fraksi bakar pelet UO_2 akan menurunkan kebutuhan bahan bakar baru per energi yang dihasilkan sulit didefinisikan karena berbeda pengkayaan dalam program penelitian yang digunakan^[2,3]. Pada akhir-akhir ini pelet UO_2 dibuat dari serbuk $\text{UO}_2/\text{U}_3\text{O}_8$ atau serbuk ammonium diuranat (ADU) yang dikompaksi lalu disinter

pada suhu 1700°C selama 2 sampai 8 jam dengan densitas awal antara 4,5 sampai 5 g/cm^3 . Serbuk UO_2 dicampurkan serbuk Cr_2O_3 sebagai aditif dapat membesarkan ukuran butir. Pelet UO_2 yang diperoleh memiliki ukuran butir berkisar antara 10 sampai $20 \mu\text{m}$, densitas dari 10,0 sampai $10,8 \text{ g/cm}^3$ dan ukuran pori mulai dari 5 sampai $80 \mu\text{m}$ ^[3]. Ukuran butir lebih besar akan diperoleh produk gas fisi rendah^[3].

Kegiatan penelitian fabrikasi pelet UO_2 berbutir besar dilakukan di fasilitas instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) dan pengujian di Reaktor Serba Guna GA Siwabessy (RSG-GAS). Pengujian/ analisis bahan bakar uji termasuk pin tipe PWR dilakukan sebelum diiradiasi di RSG-GAS. Salah satu fasilitas iradiasi yang tersedia di RSG-GAS adalah fasilitas pengujian *Power Ramp Test Facility* (PRTF)^[4]

yang dapat digunakan sebagai sarana pengujian bahan bakar untuk mendapatkan kualitas yang baik dan aman pada saat radiasi di reaktor sehingga perlu dilakukan beberapa analisis. Salah satu analisis yang dapat dilakukan adalah dengan menggunakan perhitungan program komputer^[5].

Untuk meramalkan atau memprediksi fenomena fisika, mekanik, kimia pada elemen bakar diperlukan suatu model^[5,6]. Pemodelan elemen bakar dibutuhkan bentuk struktur yang dapat memberikan pandangan secara detail dan memungkinkan dapat difabrikasi guna proses uji iradiasi^[6,7].

Evaluasi pengaruh *burn-up* terhadap pelepasan produk gas fisi dari bahan bakar UO_2 telah dilakukan^[8]. Fenomena pelepasan produk gas fisi dari bahan bakar nuklir UO_2 diasumsikan melalui dua mekanisme yaitu difusi atom gas dalam butir dan pergerakan butir membentuk gelembung^[8].

Gas fisi adalah produk dari reaksi fisi UO_2 yang menghasilkan atom-atom yang bermassa lebih kecil, seperti: Ba, Kr, Zr, Te, Sr, Cs, I, La dan Xe dengan massa atom sekitar 95 - 135. Di antara atom-atom tersebut banyak yang tidak stabil dan masih menghasilkan isotop lain hasil dari peluruhan. Di antara produk fisi yang paling berlimpah dan stabil adalah gas xenon dan kripton^[8]. Fenomena pelepasan produk gas fisi dari bahan bakar nuklir UO_2 ini diasumsikan melalui dua mekanisme yaitu difusi atom gas dalam butir

dan pergerakan butir membentuk gelembung. Gelembung kemudian tumbuh dan menyatu membentuk aliran ke arah luar dari pelet ke ruang bebas yaitu gap antara pelet dan kelongsong^[7]. Produk gas fisi (*Fission Gas Release*) merupakan gas yang berpengaruh pada fenomena unjuk kerja *pin* bahan bakar karena dapat menimbulkan tekanan gas secara internal di dalam *pin* bahan bakar, yang pada akhirnya dapat mempengaruhi integritas kelongsong dan pelet bahan bakar^[9].

Sejak terjadinya kecelakaan nuklir, banyak permasalahan yang sangat kompleks, sehingga perlu dilakukan analisis unjuk kerja pelet UO_2 hasil fabrikasi terhadap sifat termal maupun mekanik sebelum dilakukan iradiasi dalam teras reaktor.

Analisis dampak penambahan dopan Cr_2O_3 dalam rangka peningkatan ukuran butir pelet UO_2 sinter menjadi lebih besar yang dapat dihitung atau diprediksi dengan menggunakan program komputer^[6,7,8].

Pemahaman tentang mekanisme pembentukan gelembung sangat penting untuk mengontrol proses pertumbuhan gas fisi dan untuk mengoptimalkan proses iradiasi *pin* bahan bakar hasil fabrikasi pelet dengan variasi ukuran besar butir. Variasi besar butir telah dilakukan fabrikasi beberapa kali oleh peneliti sebelumnya^[1] dan disimpulkan bahwa dengan variasi penambahan dopan dapat memperbesar ukuran butir pelet UO_2 ^[1,9,10]

Tujuan penambahan dopan dalam proses penyinteran adalah untuk meningkatkan laju densifikasi dan laju pertumbuhan butir. Pada kasus lain, penambahan dopan dimaksudkan untuk meningkatkan laju densifikasi dan menghambat pertumbuhan butir sehingga diperoleh pelet dengan densitas tinggi dan berbutir halus^[9,10]. Pada intinya penambahan dan kehadiran dopan keramik dengan diameter dan valensi tertentu akan mengubah jarak antara atom dan konsentrasi cacat titik lokal dalam kisi UO_2 sehingga akan mengubah koefisien difusi atom dan laju penyinteran secara keseluruhan^[1,9,10].

Faktor ukuran akan mempengaruhi besar energi yang timbul karena interaksi elastis antara kation dopan dengan ion disekitarnya. Dengan adanya perbedaan ukuran antara kation dopan dengan kation uranium untuk UO_2 , maka terjadi distorsi kisi dan perbedaan energi regangan elastis antara *site* dengan dopan dan tanpa dopan^[10,11,12]

Pada penelitian ini dipelajari pengaruh pelet UO_2 berbutir besar hasil fabrikasi pelet UO_2 dengan variasi penambahan dopan Cr_2O_3 untuk menentukan variasi prosentase terbaik dengan menggunakan kode komputer

FEMAXI-V dalam memprediksi unjuk kerja pelet selama diiradiasi pada kondisi operasi daya berundak (*ramp test*).

2. Metodologi

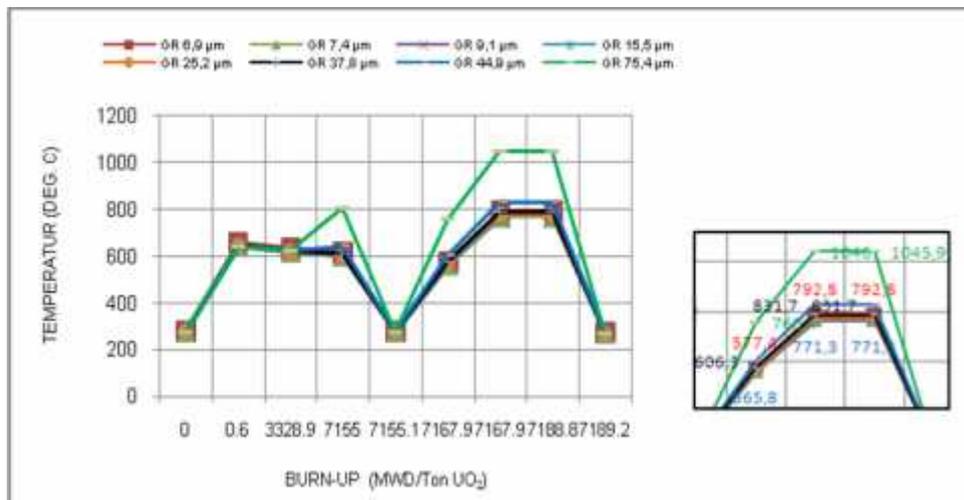
Data yang digunakan dalam analisis ini adalah data hasil fabrikasi pelet UO_2 tanpa dopan dan dengan penambahan dopan Cr_2O_3 guna memperoleh densitas pelet sinter yang meningkat dengan bertambahnya prosentase dopan untuk kondisi penyinteran yang sama dengan tanpa dopan dari hasil penelitian sebelumnya^[1]. Analisis unjuk kerja *pasca* iradiasi yang digunakan kode komputer FEMAXI-V adalah metoda yang dapat memprediksi unjuk kerja satu *pin* bahan bakar utuh dengan simulasi densitas pelet dan besar butir terhadap unjuk kerja pelet dengan asumsi kondisi *ramp test*^[6,8].

Variasi data pelet hasil fabrikasi tersebut masing-masing diidentifikasi dengan membandingkan antara pelet yang menggunakan dopan dan tanpa dopan. Selanjutnya dilakukan analisis menggunakan kode komputer FEMAXI-V untuk memprediksi fenomena fisik pelet selama uji iradiasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Untuk mengetahui pengaruh penambahan dopan terhadap pelet UO_2 sinter terhadap proses termal pasca iradiasi, telah dianalisis menggunakan kode komputer FEMAXI-V berdasarkan hasil identifikasi ukuran butir pelet UO_2 sinter yang dilakukan penelitian sebelumnya^[1], bahwa untuk pelet tanpa dopan ukuran butir 6,9 μm dan selanjutnya dengan variasi penambahan dopan Cr_2O_3 diperoleh variasi ukuran butir mulai dari 7,4 μm sampai 75,4 μm dan menghasilkan densitas pelet yang berbeda. Penambahan aditif dopan menghasilkan lapisan pada permukaan luar

butir bahan bakar untuk mengurangi produk gas fisi yang dapat membentuk *defect* oksigen dan dapat bergabung dengan produk gas fisi selama proses sinter^[3]. Tujuan analisis menggunakan kode komputer untuk menguji *pin* bahan bakar pasca iradiasi pada daya berundak dan untuk mengetahui linieritas hubungan antara daya termal terbangkitkan dengan proses termal pada pelet. Hasil analisis hubungan antara *burn-up* dengan temperatur yang terjadi pada pusat pelet selama iradiasi untuk variasi ukuran butir akibat penambahan dopan ditunjukkan pada Gambar 1.

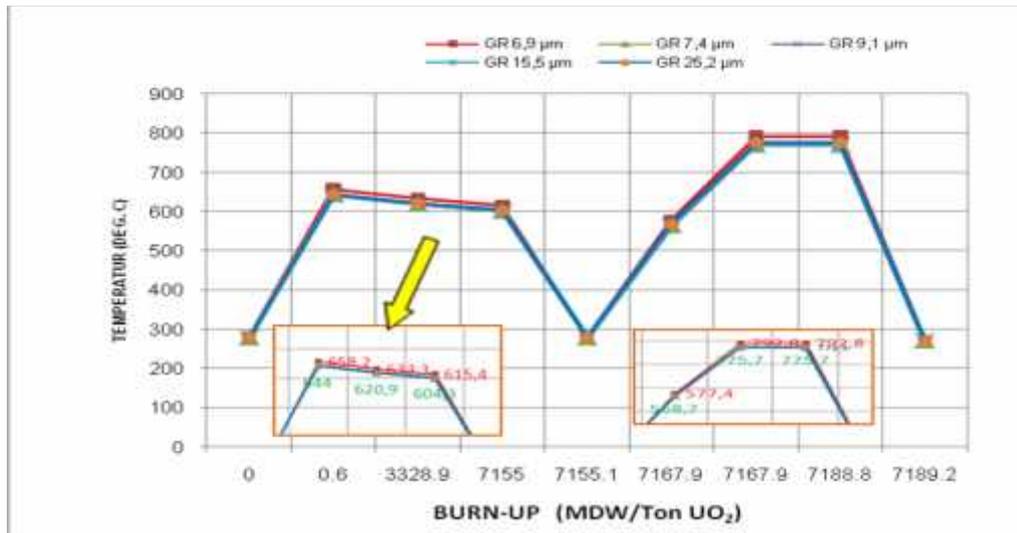


Gambar 1. Hubungan *Burn-Up* Dengan Temperatur Pada Pusat Pelet

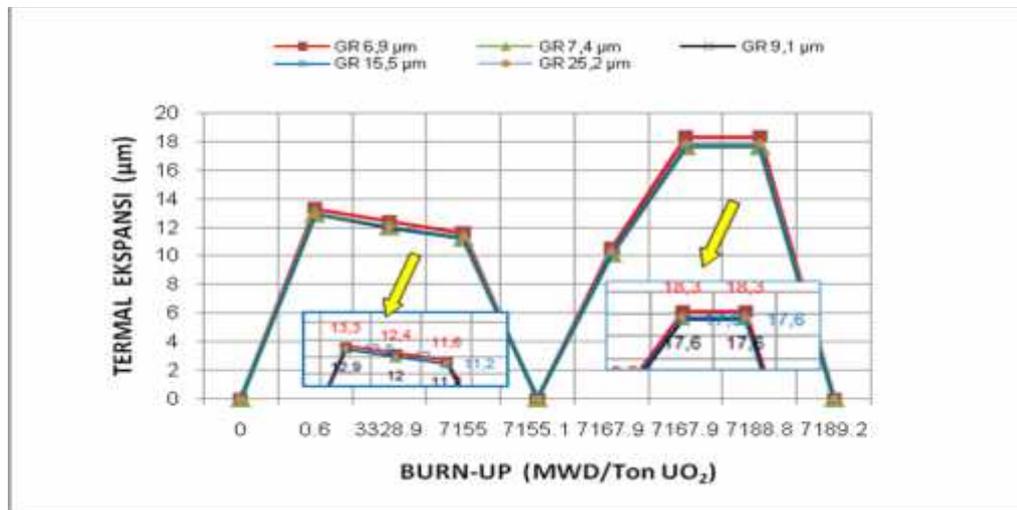
Pada Gambar 1 terlihat bahwa temperatur di pusat pelet cenderung terjadi peningkatan seiring ukuran butir semakin besar. Bila dibandingkan dengan standar data acuan yang ada bahwa ukuran butir terbaik berkisar antara 10 – 20 μm , terbukti bahwa pelet hasil fabrikasi untuk ukuran butir di atas

25 μm menunjukkan bahwa pada pusat pelet terjadi peningkatan temperatur yang tajam untuk ukuran butir 75,4 μm pada *burn-up* diatas 7167,9 MWD/ton UO_2 , sehingga dalam bahasan selanjutnya diambil untuk ukuran butir 6,9 μm sampai 25,2 μm .

Pada Gambar 2 terlihat bahwa untuk ukuran butir 9,1 μm terjadi penurunan temperatur pada pusat pelet dibandingkan dengan pelet berukuran butir 6,9 μm , 7,4 μm ; 15,5 μm dan 25,2 μm . Hal ini juga terjadi penurunan termal ekspansi pada pelet untuk ukuran butir 6,9 μm , 7,4 μm ; 15,5 μm dan 25,2 μm yang ditunjukkan pada Gambar 3.

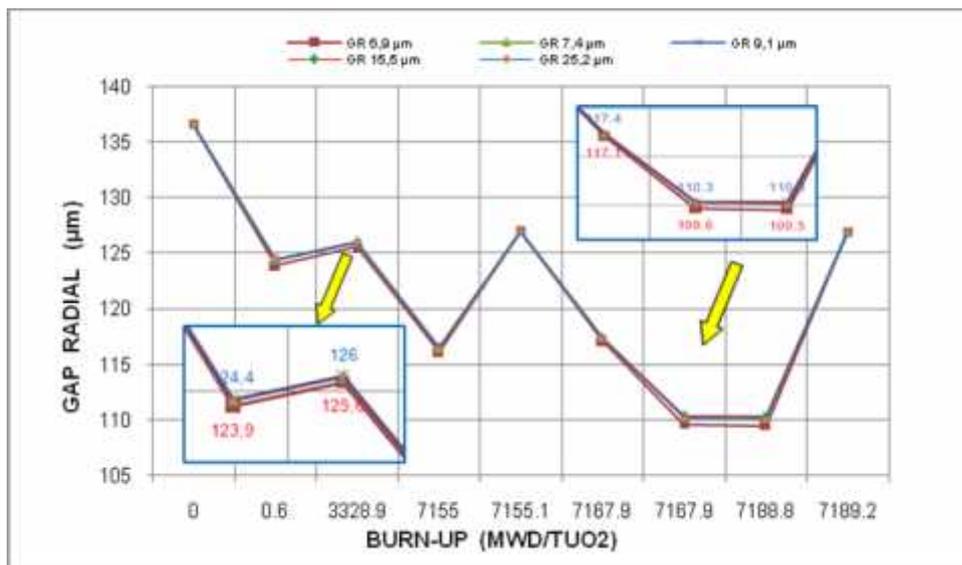


Gambar 2. Hubungan *Burn-Up* Dengan Temperatur Pada Pusat Pelet.



Gambar 3. Hubungan *Burn-Up* Dengan Ekspansi Termal Pada Pusat Pelet.

Dari informasi mekanik terhadap proses termal, hubungan antara *burn-up* dan *gap* arah radial pada pelet dengan kelongsong, diperoleh grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4. Gap arah radial antara pelet dan kelongsong mengalami kenaikan untuk pelet dengan ukuran butir 9,1 μm , sedangkan setelah ukuran butir mencapai 15,5 μm terjadi penurunan dan stabil.

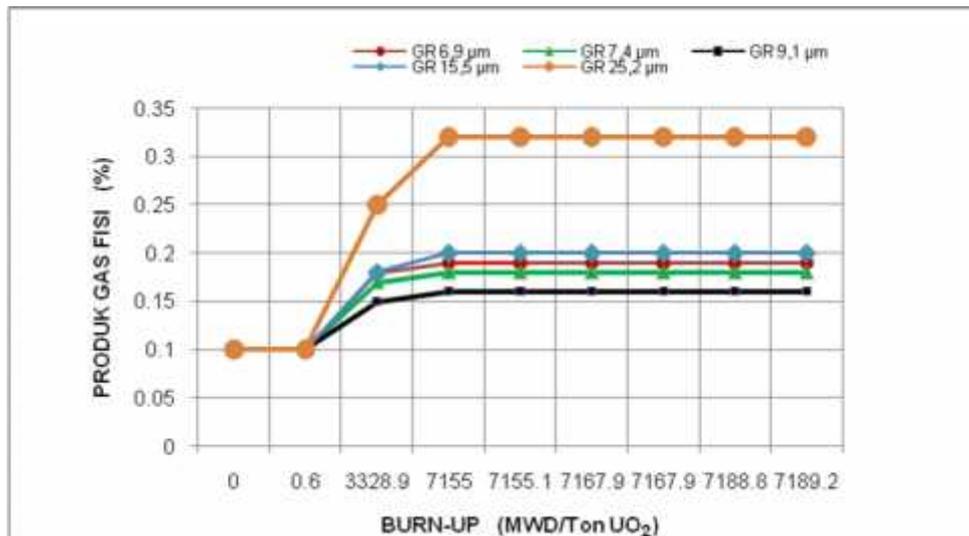


Gambar 4. Hubungan *Burn-Up* Dengan Gap Radial Antara Pelet – Kelongsong.

Hal ini menunjukkan bahwa dengan bertambahnya ukuran butir pada pelet akibat penambahan dopan masih didominasi oleh nilai total *gap* konduktan dan jarak *gap* arah radial antara pelet dan kelongsong naik, tetapi menurun untuk pelet dengan ukuran butir 15,5µm. Hal ini disebabkan oleh adanya penambahan dopan merubah struktur rongga gelembung yang berakibat daya tampung produk gas fisi besar, sehingga tidak berpengaruh terhadap perubahan jarak antara pelet dan kelongsong. Kemungkinan pada pelet tidak terjadi sweling ditunjukkan pada Gambar 4. Dari pola grafik yang diperoleh, terlihat bahwa produk gas fisi mengalami penurunan pada penambahan dopan 0,3 % Cr₂O₃ atau dengan ukuran butir antara 9,1 µm sampai 15,5 µm lebih baik bila dibandingkan dengan penambahan dopan yang lebih banyak maupun tanpa dopan. Hal ini kemungkinan

disebabkan karena produk gas fisi tertampung pada rongga gelembung yang terbentuk dan terkungkung dalam pelet tidak terlepas pada *gap* antara pelet dan kelongsong.

Gambar 5 menampilkan pola hubungan antara *burn-up* dengan produk gas fisi yang dihasilkan selama iradiasi dengan berbagai variasi ukuran butir yang diperoleh dari variasi penambahan dopan pada proses fabrikasi^[1]. Secara umum pengaruh penambahan dopan pada pelet menunjukkan pola yang sama dengan dopan <0,3 % berat Cr₂O₃ atau ukuran butir <15,5 µm. Bila dibandingkan dengan pengaruh *burn-up* terhadap temperatur pada pusat pelet (Gambar 1) dan pengaruh *burn-up* terhadap *gap* kearah radial (Gambar 4), diperlihatkan perbedaan produk gas fisi yang terlepas cukup signifikan bila dibandingkan dengan ukuran butir lainnya



Gambar 5. Hubungan *Burn-Up* Dengan Produk Gas Fisi

4. Kesimpulan

Secara keseluruhan hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan dopan mempunyai peranan yang penting dalam pembentukan produk gas fisi. Pelet UO₂ menggunakan dopan dengan ukuran butir > 9,1 μm dan < 15,5 μm) lebih baik dibandingkan dengan tanpa dopan. Fenomena ini menunjukkan bahwa pelet UO₂ berbutir besar memiliki sifat termal lebih baik dan aman dari segi keselamatan dalam pengoperasian di PRTF Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS).

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Ir. Edy Sulistyono dan Ir. Etty Mutiara, M.Eng yang telah banyak membantu dalam penyelesaian makalah ini.

6. Daftar Pustaka

1. Etty Mutiara dan Tri Yulianto. (2013). Efek Penambahan Dopan Terhadap Karakteristik Pelet UO₂ Sinter, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Urania, Vol. 19, No. 2,
2. Song K.W, Jeong Y.Y., Kim H.K. and Song K.N. (2008). High Burnup Fuel Technology In Korea, Nuclear Engineering And Technology, Vol. 40 No. 1
3. Bernhard Kienzle dan Volker Metz. (2012). The 7th Framework Programme Collaborative Project FIRST-Nuclides : State-of-the-Art and Rationale for Experimental Investigation.
4. Sudirdjo, H. (2011). Uji Fungsi *Power Ramp Test Facility* (PRTF) RSG-GAS Pasca Perbaikan, Proseding Seminar

- Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir – PTAPB.
5. Suzuki Motoe, (1999) “FEMAXI-V : A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods, JAERI.
 6. Edy Sulistyono, Tri Yulianto, Etty Mutiara, (2013), Analisis Pengaruh Daya untuk Pengujian pin Bahan Bakar tipe PWR di PRTF RSG-GAS, Jurnal Teknologi Bahan Nuklir.
 7. Edy Sulistyono, Etty Marti Wigayati, (2013), Analisis Sifat Termal Terhadap Unjuk Kerja Pin Bahan Bakar Nuklir Tipe PWR pada Kondisi Tunak, URANIA Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, Vol. 19 No. 2, ISSN 0852-4777.
 8. Edy Sulistyono, (2013), Evaluasi Pengaruh *Burn-up* Terhadap Pelepasan Produk Gas Fisi, Prosiding PIN Penelitian Elemen Bakar Nuklir Tahun 2013, ISSN 1979-2409.
 9. Edy Sulistyono, Etty Marti Wigayati, (2014), Simulasi Creep Pada Kelongsong Pin Bahan Bakar Nuklir Tipe PWR Dengan FEMAXI-V, Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir, Vol. XI, No. 2, ISSN 0216-2695.
 10. Gislaine Bezerra Pinto Ferreira et al. (2012) Two Step sintering Applied to ceramics. Sintering Applied to ceramics. Sintering of ceramics – New Emerging Techniques
 11. Martin P Hamer (2010). Interfacial Kinetic Engineering: Ho Far have We Come Since Kingery’s Inaugural Sosman Address. J. Am Ceram Soc, 93[2].
 12. Wonyoung Lee, et al. (2013) Cation Size Mismatch and Charge Interactions Drive Dopant Segregation at the Surfaces of Manganite Perovskites, J. Am. Chem. Soc., 135.