

REGANGAN MIKRO DAN PENGARUHNYA TERHADAP MORFOLOGI MIKROSTRUKTUR HASIL OKSIDASI GAGALAN PELET SINTER UO_2

Ratih Langenati, Futichah

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN, Serpong
(Diterima 4 September 2009; disetujui 26 Oktober 2009)

ABSTRAK

REGANGAN MIKRO DAN PENGARUHNYA TERHADAP MORFOLOGI MIKROSTRUKTUR HASIL OKSIDASI GAGALAN PELET SINTER UO_2 . Pada proses pembuatan pelet sinter uranium dioksida (UO_2) kadang dihasilkan pelet sinter yang tidak memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan, yang disebut dengan gagal pelet sinter. Untuk memanfaatkan kembali gagal tersebut maka dilakukan olah ulang melalui proses oksidasi dan reduksi sehingga dihasilkan serbuk uranium dioksida yang dapat digunakan kembali sebagai umpan pada pembuatan pelet bahan bakar. Pada penelitian ini telah dilakukan oksidasi gagal pelet sinter UO_2 pada suhu $600\text{ }^\circ\text{C}$ dengan lama pemanasan 1, 2, 3, 4 dan 5 jam dengan atmosfer udara. Hasil proses oksidasi menimbulkan perubahan regangan mikro pada pelet dan diduga berpengaruh terhadap morfologi mikrostruktur pelet UO_2 tersebut. Fenomena ini perlu dipelajari untuk melengkapi data yang ada sehingga menambah informasi proses olah ulang gagal pelet sinter UO_2 . Studi dilakukan menggunakan difraksi sinar-X dan metalografi dengan *scanning electron microscopy* (SEM) terhadap hasil oksidasi gagal pelet sinter UO_2 . Dari hasil percobaan diketahui bahwa regangan mikro semakin meningkat hingga mencapai 0,0071 pada selang waktu oksidasi 1 sampai 3 jam dan menurun menjadi 0,0027 pada selang waktu 4 sampai 5 jam. Demikian juga untuk ukuran dan aglomerasi butir meningkat hingga mencapai 1000 nm pada selang waktu 1 sampai 3 jam dan menurun drastis hingga setengahnya pada selang waktu 4 sampai 5 jam. Sementara itu peningkatan regangan mikro selama oksidasi berarti energi dalam yang terbentuk belum terkonversi menjadi energi untuk proses pembentukan kristal yang stabil pada pelet uranium oksida. Penurunan regangan mikro hingga menjadi 0,0027 memberikan indikasi bahwa proses kristalisasi pada pelet uranium oksida sudah terbentuk dan stabil dengan ukuran aglomerasi yang menurun dan ukuran butir semakin halus hingga diperoleh diameter butir sekitar 500 nm.

KATA KUNCI: regangan mikro, oksidasi UO_2 , gagal pelet sinter UO_2 , mikrostruktur, kristalinitas uranium oksida

ABSTRACT

THE MICROSTRAIN AND ITS EFFECTS ON THE MICROSTRUCTURE MORPHOLOGY OF THE OXIDATION RESULTS OF REJECTED UO_2 SINTERED PELLETS. On fabrication of uranium dioxide (UO_2) sintered pellets, there are pellets that do not meet the specifications, called rejected sintered pellets. In order to reuse the rejected pellets, reprocessing was performed by means of oxidation and reduction to obtain uranium dioxide powder that can be reused as the raw material for fabrication of fuel pellets. In this research, rejected UO_2 pellets were oxidized at a temperature of $600\text{ }^\circ\text{C}$ for 1, 2, 3, 4 and 5 hours in atmospheric condition. The oxidation process resulted in the change of microstrain in the pellets, and it was deemed to correlate with the microstructure morphology of the UO_2 pellets. This phenomenon was studied to complete

the database, thus building up information on the reprocessing of rejected UO_2 sintered pellets. The study was conducted using X-ray diffraction for phase determination and scanning electron microscopy (SEM) for metallography. From the experiment results, it was revealed that the values of the microstrain increased up to 0.0071 for the oxidation time from 1 to 3 hours, and decreased to 0.0027 for the oxidation time of 4 to 5 hours. Similarly, the size and the agglomeration of grains increased up to 1000 nm for the oxidation time between 1 to 3 hours and drastically reduced by half for the oxidation time between 4 to 5 hours. Meanwhile, the increasing microstrain during oxidation suggested that the internal energy that was built up had not yet been converted into the processing energy for the formation of stable crystals of uranium oxide. The smaller microstrain of 0.0027 indicated that the process of uranium oxide crystallization had been achieved and the crystal was stable, with smaller agglomerate sizes and finer grains of 500 nm in diameter.

FREE TERMS: microstrain, oxidation, rejected UO_2 sintered pellet, microstructure, uranium oxide crystallinity

I. PENDAHULUAN

Serbuk uranium atau UO_2 alam yang telah melewati uji kendali kualitas bahan bakar PHWR dan dengan distribusi ukuran partikel tertentu, dipres dengan tekanan tinggi menjadi pelet mentah (*green pellet*) berbentuk silinder. Pelet mentah kemudian disinter dalam tungku pada suhu dan waktu tertentu. Pelet hasil sinter disempurnakan dengan penggerindaan (*grinding*) sehingga membentuk pelet akhir dengan dimensi yang sesuai dengan spesifikasi yang ditetapkan. Selanjutnya dilakukan uji kualitas seperti visual, kekasaran permukaan, berat, dimensi (panjang dan diameter), densitas, angka perbandingan O/U, mikrostruktur, kelembaban, kandungan F dan Cl serta pengotor. Seluruh rangkaian proses ini sering disebut sebagai tahapan proses peletisasi^[1-3]. Dalam proses peletisasi kemungkinan terjadinya kegagalan tidak dapat dihindari, misalnya pelet yang dihasilkan retak, berpori dengan ukuran terlalu besar, ukuran diameter dan tinggi pelet yang tidak sesuai dengan spesifikasi yang diijinkan. Pelet demikian dikelompokkan sebagai pelet yang tidak digunakan (gagalan pelet). Produk pelet yang gagal ini semakin lama semakin banyak, oleh karena itu perlu diupayakan untuk menangani dan memanfaatkan kegagalan pelet sinter tersebut. Salah satu bidang di PTBN yang melaksanakan kegiatan pengembangan teknologi produksi bahan bakar PHWR (CANDU) serta menangani dan memanfaatkan kegagalan pelet sinter adalah Bidang Bahan Bakar Nuklir (B3N).

Salah satu upaya untuk penanganan dan pemanfaatan kegagalan pelet sinter yang telah dicoba adalah dengan mengoksidasi kegagalan pelet UO_2 pada suhu 600 °C dan mereduksi kembali pada suhu dan selang waktu tertentu. Proses oksidasi adalah proses pemanasan kegagalan pelet *sinter* uranium dioksida dalam tungku pada suhu tertentu yang dapat mengakibatkan terjadinya oksidasi. Faktor-faktor yang mempengaruhi antara lain suhu, waktu pemanasan dan laju alir gas oksigen. Secara umum, semakin tinggi suhu atau semakin lama pemanasan, proses oksidasi semakin cepat. Akibat proses oksidasi, pelet UO_2 berubah menjadi serbuk U_3O_8 yang selanjutnya direduksi kembali menjadi serbuk UO_2 ^[3-5]. Serbuk UO_2 yang diperoleh bila sudah memenuhi spesifikasi yang diijinkan maka serbuk tersebut siap digunakan kembali menjadi campuran bahan umpan pelet mentah.

Hasil proses oksidasi menimbulkan perubahan regangan mikro pada pelet dan diduga berpengaruh terhadap morfologi mikrostruktur serbuk uranium oksida yang dihasilkan.

Fenomena ini perlu dipelajari untuk melengkapi data yang ada sehingga menambah informasi proses olah ulang gagal pelet sinter UO_2 . Oleh karena itu dalam penelitian ini dilakukan uji kristalografi dengan menggunakan difraksi sinar-X dan metalografi dengan *scanning electron microscopy* (SEM) terhadap hasil oksidasi gagal pelet sinter UO_2 . Proses oksidasi dilakukan dalam tungku pada suhu $600\text{ }^\circ\text{C}$ dengan selang waktu 1, 2, 3, 4 dan 5 jam.

II. TEORI

Jika ukuran kristalit di dalam serbuk rata-rata kurang dari 2000 \AA terjadi penambahan pelebaran puncak difraksi sinar-X, maka istilah “ukuran partikel” dapat digunakan^[6,7]. Dari pengukuran pelebaran tambahan, rata-rata ukuran kristalit dapat diperoleh. Untuk partikel berukuran lebih besar dari 2000 \AA , tidak ada penambahan pelebaran garis serbuk atau puncak difraksi. Hal ini disebabkan oleh :

- radiasi tidak benar-benar absolut monokromatis
- garis $K\alpha$ memiliki lebar intrinsik terhadap prinsip ketidak pastian Heisenberg
- fokus geometri dari alat tidak tepat

Kisi tiga dimensi sebuah kristal mendifraksikan sinar-X dengan cara analog terhadap refleksi cahaya yang dapat dilihat dan kaidah difraksi kisi. Pada kasus sinar-X, terjadi difraksi *diffuse* jika ukuran kristalit hampir sama dengan panjang gelombang sinar datang^[6-8]. Semakin berkurang ukuran kristalit, sinar terdifraksi menjadi lebih *diffuse* sampai akhirnya hilang dan menjadi latar belakang. Inilah yang merupakan divergensi dari radiasi sinar-X yang merupakan dasar pengukuran ukuran kristalit. Dari pustaka^[6-8] ada beberapa metode perhitungan ukuran kristalit dan tegangan kisi, yaitu :

- Metode yang menggunakan persamaan Scherrer
- Metode yang menggunakan persamaan Hall
- Koreksi Jone
- Pemakaian kurva lebar integral

Penentuan lebar difraksi murni β membangun suatu hubungan yang saling menunjang terhadap analisa ukuran kristalit (D). Persamaan pendekatan menurut formula Scherrer:

$$D_{hkl} = K.\lambda / (\beta.\cos \theta) \quad (1) \text{ [6-8]}$$

Dengan nilai konstanta Scherrer K antara 0,7 sampai dengan 1,7 dan λ adalah panjang gelombang dalam \AA . Melalui postulat awal Scherrer, lebar $\frac{1}{2}$ puncak difraksi maksimum (B) dipengaruhi oleh faktor pelebaran alat (b) dan pelebaran difraksi murni (β). Hubungan tersebut dibentuk dengan asumsi bahwa kristal adalah kubik, tegangan dalam kristal diabaikan dan profil intensitas (I) adalah fungsi Cauchy:

$$I_x = \frac{I_p(x)}{(1 + k^2 X^2)}$$

$$B = \beta + b \quad (2) \text{ [6-8]}$$

Hal ini tidak dapat diterapkan secara umum, walaupun cukup baik untuk kasus sudut besar dan sumber sinar-X yang sempit. Kemudian Waren menurunkan hubungan antara lebar integral yaitu :

$$B^2 = \beta + b^2 \quad (3) \text{ [6-8]}$$

Di sini profil pelebaran difraksi murni dan pelebaran alat keduanya diasumsikan sebagai bentuk Gaussian $I(x) = I_p(x) \exp(-k^2x^2)$. Kedua hubungan ini berlaku untuk setengah lebar maksimum dan lebar integral. Profil garis difraksi sinar-X yang telah diselidiki dapat dianalisa secara matematis dengan Transformasi Fourier^[8]. Metode ini digunakan oleh Jone^[8], yang mengasumsikan bentuk profil alat adalah Cauchy. Juga beberapa penelitian menunjukkan bahwa profil β yang disebabkan oleh distribusi ukuran kristalit lebih mendekati Cauchy daripada Gaussian.

Sementara itu Stokes dan Wilson^[8] menyatakan bahwa ukuran rata-rata D dan lebar integral murni β dari kristalit memiliki hubungan sebagai berikut:

$$\beta = \lambda / (D \cdot \cos \theta) \quad (4)$$

Dan mereka telah mendefinisikan regangan kisi ϵ dengan persamaan:

$$\epsilon = \frac{b}{2 \cdot \tan \theta} \quad (5)$$

Jika persamaan (4) dan (5) disubstitusikan pada persamaan (2), maka persamaan Hall menjadi:

$$B = (\lambda / (D \cdot \cos \theta)) + 2\epsilon \cdot \tan \theta \quad (6)$$

yang dapat ditulis dalam bentuk :

$$B \cos \theta = \frac{0.94 \lambda}{D} + \epsilon \sin \theta \quad (7)^{[8,9]}$$

Jika persamaan Hall dikaitkan dengan luasan penuh setengah maksimum (FWHM), maka persamaannya menjadi :

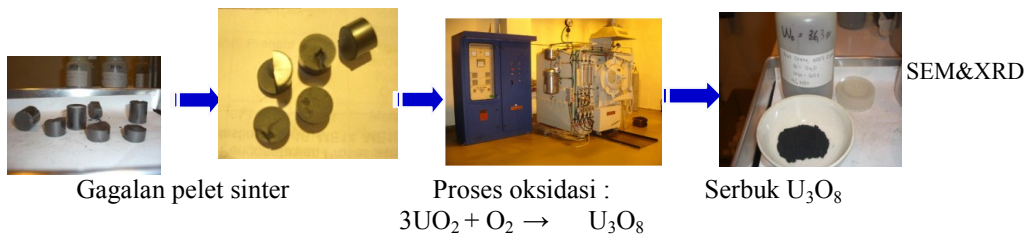
$$\epsilon = \frac{-2\Delta d}{d} \quad (8)$$

$$\epsilon = \frac{n \Sigma \sin \theta B \cos \theta - \Sigma \sin \theta \Sigma B \cos \theta}{n \Sigma (\sin^2 \theta) - (\Sigma \sin \theta)^2} \quad (9)^{[8,9]}$$

Metode yang menggunakan persamaan Hall ini lebih tepat untuk menghitung regangan kisi (ϵ) dengan asumsi bahwa lebar garis difraksi hanya dipengaruhi oleh regangan kisi. B adalah luasan penuh setengah maksimum (FWHM), λ adalah panjang gelombang (unsur Cu = 0,154 056 nm), θ adalah sudut difraksi, dan D adalah ukuran partikel.

III. TATA KERJA

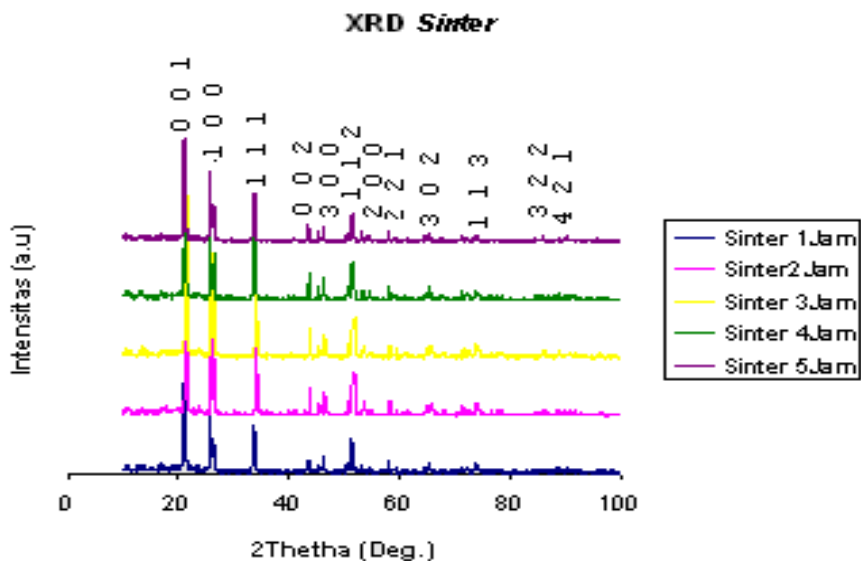
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah gagal pelet sinter uranium oksida yang ada di HR-05. Pelet-pelet tersebut diperiksa rasio O/U-nya dengan metode gravimetri, mikrostruktur dengan *scanning electron microscopy* (SEM) dan fase yang ada dengan *X-Ray Diffraction* (XRD). Selanjutnya kedua sampel tersebut ditimbang dan dipanaskan dalam tungku dengan suhu pemanasan $600\text{ }^\circ\text{C}$ dan laju pemanasan sekitar $3 - 5\text{ }^\circ\text{C}/\text{menit}$ dan lama pemanasan (*soaking time*) sebesar 1, 2, 3, 4 dan 5 jam. Kemudian hasil yang diperoleh diperiksa fase yang ada menggunakan XRD JEOL-DX-GERP-12 dan mikrostrukturnya menggunakan SEM.



Gambar 1. Proses oksidasi gagal pelet sinter UO_2

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dari hasil uji kristalografi dengan XRD diperoleh Gambar 2, yaitu pola difraksi gagal pelet UO_2 hasil oksidasi pada suhu $600\text{ }^\circ\text{C}$ dengan waktu 1, 2, 3, 4 dan 5 jam. Untuk analisis regangan mikro (ϵ), digunakan persamaan (9) dan data pengukuran FWHM.



Gambar 2. Pola difraksi hasil oksidasi gagal pelet sinter

Tabel 1. Analisis ukuran regangan mikro (ϵ) hasil oksidasi gagal pelet sinter

Waktu oksidasi 1 jam pada suhu 600 °C						
Puncak	FWHM, B (°)	B (rad)	2 θ	θ	Cos θ	$\sin^2 \theta \cdot B^2$ (x ²)
1	0,217	0,003 785 44	21,16	10,5805	0,983 015	0,033 6813
2	0,325	0,005 669 44	25,77	12,883	0,974 853	0,049 662
3	0,325	0,005 669 44	33,68	16,8385	0,957 168	0,083 829
4	0,379	0,006 611 44	43,38	21,6875	0,929 284	0,136 431
5	0,542	0,009 454 89	51,45	25,724	0,900 994	0,303 6034
Σ						1,134 805 876

Tabel 1 (sambungan)

$\sin^2 \theta \cdot B^2$ (x ²)	$B \cos \theta$ (x·y)	$(B \cos \theta)^2$ (y ²)	$\sin \theta \cdot B \cos \theta$ (x·y)
0,183 524 782	0,003 721 149	1,384 69 E-05	0,000 682 923
0,222 849 767	0,005 526 874	3,054 63 E-05	0,001 231 663
0,289 5324	0,005 426 612	2,944 81 E-05	0,001 571 18
0,369 365 727	0,006 143 91	3,774 76 E-05	0,002 269 35
1,065 272 677	0,020 818 545	0,000 111589	0,005 755 115
$\Sigma = 2,130 545 353$	$\Sigma = 0,041 637 09$	$\Sigma = 0,000 433 412$	$\Sigma = 0,011 510 231$

Dari nilai-nilai di Table 1 maka dapat dihitung nilai regangan yang terbentuk dengan menggunakan persamaan (9) yaitu:

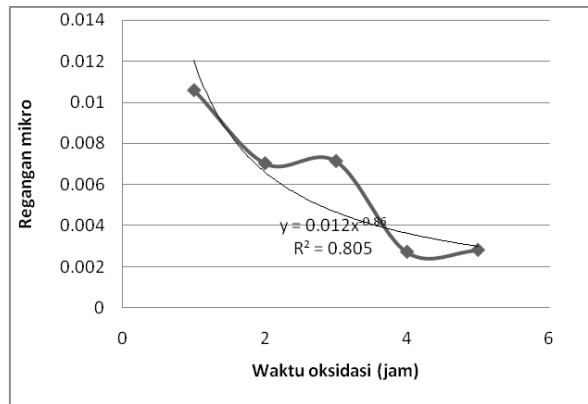
$$\epsilon = \frac{(n \sum \sin \theta B \cos \theta - \sum \sin \theta \sum B \cos \theta)}{n \sum (\sin^2 \theta) - (\sum \sin \theta)^2}$$

Tabel 2. Nilai regangan mikro dan diameter butir uranium oksida hasil oksidasi gagal pelet sinter UO₂

Sampel	Waktu oksidasi (jam)	Regangan mikro, ϵ
UO ₂	1	0,010 589 852
	2	0,007 032 053
	3	0,007 141 207
	4	0,002 716 821
	5	0,002 811 999

Nilai FWHM ini menunjukkan kondisi fisik sistem kristal dalam bahan. Pada umumnya apabila pada FWHM terjadi pelebaran maka hal ini menunjukkan adanya indikasi terjadinya cacat kristal atau ketidaksempurnaan kristal seperti yang telah diuraikan di Teori. Cacat kristal ini dapat berupa adanya kekosongan atom pada kristal, substitusi atom dengan ukuran atau diameter atom yang lebih besar atau lebih kecil, interstisi atom ke dalam sistem kristal, atau hal lain yang semuanya itu mengakibatkan deformasi elastis akibat adanya regangan mikro dalam sistem kristal^[6-9]. Peristiwa pelebaran FWHM pada hasil oksidasi gagal pelet sinter, kemungkinan besar diakibatkan oleh adanya penambahan unsur oksida

dalam pelet keramik UO_2 . Keramik UO_2 yang semula berstruktur *fluorite (cubic)* setelah mengalami peristiwa oksidasi, maka komposisi unsur oksigen dalam keramik semakin tinggi. Peningkatan unsur oksigen ini adalah seiring dengan karakteristik UO_2 yang mengalami metamorfosis kristal penyusunnya, yaitu terjadinya perubahan struktur kristal *fluorite (cubic)* menjadi bentuk kristal ortorombik^[5,10,11].



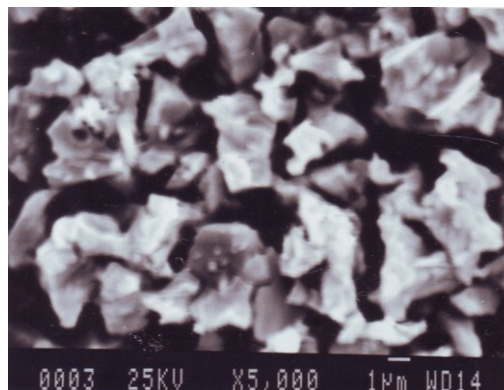
Gambar 3. Pengaruh waktu oksidasi gagal pelet sinter terhadap regangan mikro sistem kristal yang terbentuk

Tabel 2 atau Gambar 3 menunjukkan nilai regangan mikro (ϵ) dari hasil oksidasi gagal pelet sinter UO_2 . Jika diamati dari Tabel 2 diperoleh bahwa pelet sinter dengan waktu oksidasi 1 jam memiliki regangan mikro (ϵ) sebesar 0,010 589 852, selanjutnya pada waktu 2 dan 3 jam nilai regangan mikro (ϵ) menurun menjadi 0,007 032 053 dan 0,007 141 207. Pada waktu oksidasi 4 dan 5 jam, nilai regangan mikro (ϵ) mengalami penurunan yang cukup tinggi yaitu hingga 0,002 716 821 dan 0,002 811 999. Nilai regangan mikro pada waktu oksidasi 4 jam sedikit lebih rendah daripada waktu oksidasi 5 jam, maka perlakuan oksidasi selama 4 jam pada suhu 600 °C adalah sudah cukup efektif. Persamaan korelasi antara waktu oksidasi dan regangan mikro yang terbentuk adalah $\epsilon = 0,012 t^{(-0,86)}$. Jika ditinjau dari peristiwa proses oksidasi, maka untuk unsur oksigen yang masuk dalam keramik UO_2 , semakin lama waktu oksidasi maka jumlah oksigen semakin bertambah. Penurunan regangan mikro ini disebabkan oleh interstisi atom O yang berdiameter 0,120 nm (lebih kecil dari atom U yang berdiameter 0,276 nm) ke dalam *fluorite (cubic)* sehingga pada awalnya terjadi dilatasi kisi, tetapi dengan adanya suhu pemanasan 600 °C maka pada peristiwa berikutnya struktur *fluorite (cubic)* mengubah diri menjadi struktur ortorombik dan atom O menempati posisinya. Akibat dari atom O yang sudah menempati posisinya maka sistem kristalografi tidak terganggu dan selanjutnya terjadi penurunan regangan mikro. Peningkatan jumlah atom O dalam senyawa UO_2 mengakibatkan bidang gelincir yang padat dengan atom O akan mudah bergerak^[5]. Dengan kata lain, secara makro hal ini membantu proses pergelinciran dislokasi dalam bahan, sehingga pelet UO_2 mudah terdeformasi dengan sendirinya, atau mudah rapuh akibat pergerakan cacat-cacat mikro ke permukaan pelet pada bidang gelincir yang padat dengan atom O. Dengan demikian, dapat dikatakan bahwa semakin lama waktu oksidasi maka semakin

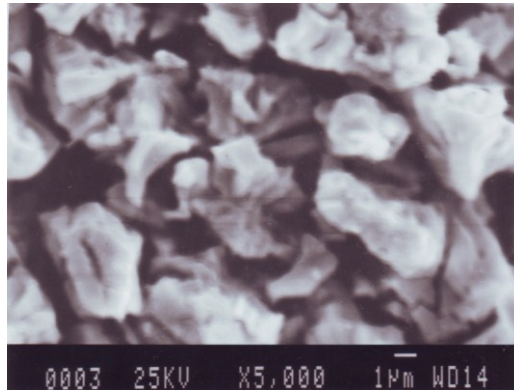
menurun regangan mikro dalam senyawa UO_2 yang berakibat semakin mudahnya pelet UO_2 terdeformasi atau merekah, hancur dan menjadi serbuk U_3O_8 . Hasil pengamatan mikrostruktur dengan SEM terhadap morfologi uranium oksida hasil oksidasi akan memperkuat dugaan dari fenomena ini.

Gambar 4, 5, 6 dan 7 menunjukkan perubahan mikrostruktur terhadap waktu oksidasi, sedangkan Gambar 8 menunjukkan korelasinya terhadap regangan mikro yang terbentuk. Pada awal pemanasan terjadi difusi oksigen secara maksimal ke dalam struktur kristal UO_2 selama selang waktu pemanasan 1 sampai dengan 3 jam, yang secara visual ditunjukkan dalam mikrostruktur pada Gambar 4 dan 5, yaitu adanya perekahan aglomerasi partikel yang sebelumnya berbentuk masif. Selanjutnya, Gambar 6 menunjukkan perubahan mikrostruktur selama selang waktu 5 jam, dimana oksigen yang masuk membentuk struktur kristal baru uranium oksida yang lebih stabil yaitu U_3O_8 . Selama penyusunan struktur baru, terjadi perubahan volume kristal secara mikro (struktur kristal *fluorite* menjadi bentuk kristal ortorombik) dan butir secara makro menghasilkan ukuran butir yang lebih halus, yaitu rata-rata 500 nm. Korelasi waktu oksidasi terhadap perubahan diameter butir uranium oksida hasil oksidasi dapat dilihat pada Gambar 7 dengan pendekatan korelasi $D = -56,07 t^2 + 257,9 t + 550$.

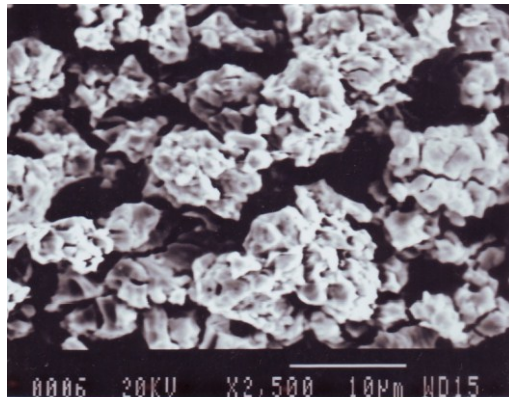
Pada selang waktu oksidasi 1 sampai 3 jam, disamping terjadi penyerapan oksigen secara besar-besaran, juga berakibat pada peningkatan regangan mikro dari sistem kristal dan secara makro tampak pembesaran ukuran butir. Dalam kondisi ini energi dalam yang terbentuk belum terkonversi menjadi energi untuk proses pembentukan kristal yang stabil pada pelet uranium oksida. Pada selang waktu oksidasi di atas 4 jam, akhirnya regangan mikro dilepaskan hingga menjadi 0,0027 seiring dengan perubahan mikrostruktur dari uranium oksida menjadi ukuran butir yang lebih halus (rata-rata 500 nm). Hal ini mengindikasikan bahwa proses kristalisasi pada pelet uranium oksida sudah terbentuk dan stabil. Korelasi regangan mikro yang terbentuk dengan perubahan ukuran butir dapat didekati dengan persamaan $D = -2 \times 10^7 \epsilon^2 + 25\,733 \epsilon - 85,92$ seperti tampak pada Gambar 8.



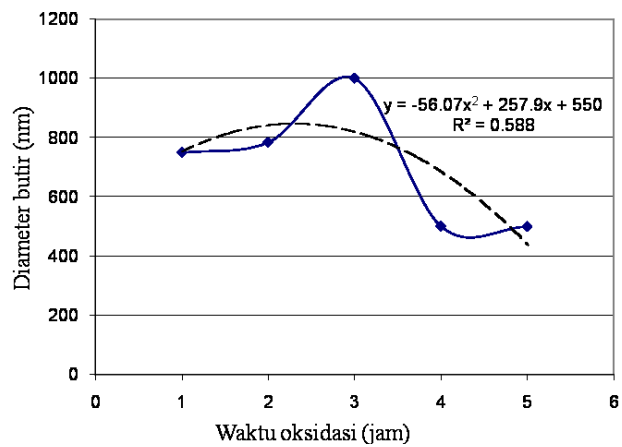
Gambar 4. Mikrostruktur hasil oksidasi gagal pelet sinter suhu 600 °C, 1 jam



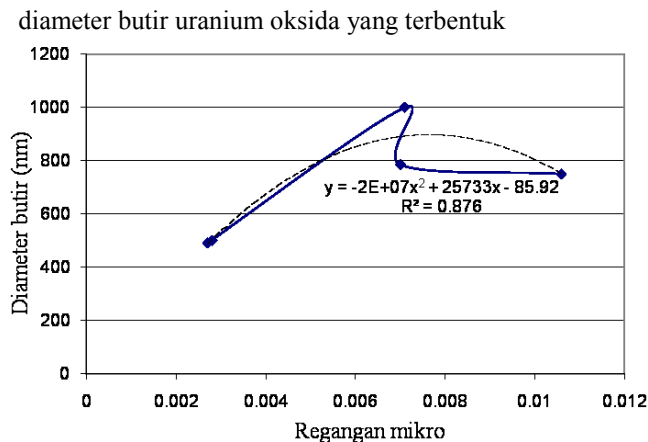
Gambar 5. Mikrostruktur hasil oksidasi gagal pelet sinter suhu 600 °C, 3 jam



Gambar 6. Mikrostruktur hasil oksidasi gagal pelet sinter suhu 600 °C, 5 jam



Gambar 7. Korelasi antara perubahan waktu oksidasi terhadap perubahan



Gambar 8. Korelasi regangan mikro yang terbentuk terhadap diameter butir uranium oksida hasil proses oksidasi gagal pelet sinter

V. KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan dan analisis regangan mikro dan keterkaitannya dengan ukuran butir uranium oksida yang terbentuk, dapat disimpulkan sebagai berikut. Waktu oksidasi gagal pelet sinter UO_2 berpengaruh terhadap nilai regangan mikro (*microstrain*) dalam sistem kristal dan ukuran butir yang terbentuk. Semakin lama proses oksidasi semakin menurun nilai regangan mikro dari kristal atau senyawa UO_2 dan ukuran butir yang dihasilkan. Waktu oksidasi yang paling efektif adalah 4 jam pada suhu 600 °C. Korelasi peningkatan waktu oksidasi dan penurunan regangan mikro adalah $\varepsilon = 0,012 t^{(-0,86)}$ sedangkan korelasi regangan mikro terhadap ukuran butir yang terbentuk adalah $D = -2 \times 10^7 \varepsilon^2 + 25\,733 \varepsilon - 85,92$.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. RENCANA STRATEGIS PUSAT TEKNOLOGI BAHAN BAKAR NUKLIR-BATAN 2006-2010
2. ENEA, Manufacturing CIRENE fuel, Comb. IEEC, Nuclear Fuel Manufacturing Division, Italy.
3. SIGIT, N.Y., “Karakteristik Hasil Proses Oksidasi-Reduksi Siklus 1 Uranium Oksida”, Puspitex Serpong, Tangerang, 2006.
4. JAMALUDIN, A., “Analisis Kandungan Air dalam Serbuk UO_2 ”, Buletin URANIA, Vol.12, No.3, 2006, hal.113-156.
5. OLANDER, D.R., “Mechanistic Interpretations of UO_2 Oxidation”, Journal of Nuclear Materials, Elsevier Science Ltd, Vol.252, 1998, pp.121-130.
6. CULLITY, B.D., “Element of X-Ray Diffraction”, Addison-Wesley, USA, 1978, pp.281-294.
7. KLUG, H.P., and ALEXANDER, L.E., “X-ray Diffraction Procedures”, John Willey & Sons, New York, 1974, pp.618-640.
8. EVI KARTINI, B., “Penentuan Ukuran Kristalit dan Tegangan Kisi pada ZnO 5% dan ZnO 10% dengan Difraktometer Sinar-X (XD-610)”, Prosiding Seminar Pendayagunaan

- Reaktor Nuklir untuk Kesejahteraan Masyarakat, PPTN-Bandung, 26-27 September 1990, hal.423-427.
9. IRZAMAN, Y. DARVINA, P. ARIFIN, M. BUDIMAN, and M. BARMAWI, "Lattice Constants Analysis of Tantalum Oxide Doped Lead Zirconium Titanate Ceramic by Delphy Program", The Indonesian Journal of Physics, Vol.16, No.2, pp.47-52.
 10. DANI, G.S, FUKUDA, K., KIYOSE, R., and SAKIDJA, R., "Cacat Kristal dan Pengaruhnya terhadap Pertumbuhan Butir Pelet UO_2 yang Ditambah Ca", Prosiding Seminar Sains dan Teknologi Nuklir, PPTN-Bandung, 12-13 Maret 1996, hal.407-413.
 11. JAIN, A., ANANTHASIVAN, K., ANTHONYSAMY, S., and VASUDEVA RAO, P.R., "Synthesis and Sintering of $(U_{0.72}Ce_{0.28})O_2$ Solid Solution", Journal of Nuclear Materials, Vol.345, 2005, pp.245-253.