

KARAKTERISASI INDEKS SINTERING, MIKROSTRUKTUR DAN MORFOLOGI KERNEL UO_2 HASIL SINTERING SECARA FLUIDISASI

Damunir, Moch. Setyadji

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan - BATAN
Jl. Babarsari P.O. Box 1008 Yogyakarta 55010
e-mail : p3tm@indo.net.id
(Diterima 09-01-2012, disetujui 27-03-2012)

ABSTRAK

KARAKTERISASI INDEKS SINTERING, MIKROSTRUKTUR DAN MORFOLOGI KERNEL UO_2 HASIL PROSES SINTERING SECARA FLUIDISASI. Karakterisasi indeks sintering, mikrostruktur dan morfologi kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi telah dilakukan. Tujuan penelitian ini adalah mengetahui indeks sintering, mikrostruktur dan rasio O/U, bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 yang dihasilkan karena perubahan suhu dan waktu pada proses sintering secara fluidisasi. Sebanyak 2 g kernel UO_2 hasil reduksi sebagai umpan diletakkan pada wadah grafit dalam tungku fluidized bed dan ditutup, kemudian udara didalam tungku dikeluarkan dengan mengalirkan gas argon. Gas argon sebagai fluida dialirkan dari bawah keatas melalui butiran kernel UO_2 pada tekanan 2 bar dengan kecepatan alir sebesar 33,3ml/menit hingga terjadi proses fluidisasi. Suhu fluidisasi di variasi pada 1000, 1050, 1100 dan 1150 °C selama 2 jam. Dengan cara yang sama, waktu fluidisasi di variasi selama 1,2, 3 dan 4 jam pada suhu 1100 °C. Kernel UO_2 yang dihasilkan, di karakterisasi indeks sintering menggunakan persamaan Timmermans, mikrostruktur menggunakan SEM pada pembesaran 1000X, bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 menggunakan mikroskop optik pada pembesaran 50X, dan rasio O/U dengan metode gravimetri. Hasil percobaan menunjukkan bahwa suhu dan waktu sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon berpengaruh terhadap perubahan indeks sintering, mikrostruktur, morfologi yang meliputi bentuk butiran dan diameter butiran, dan rasio O/U kernel UO_2 yang di hasilkan. Kondisi sintering secara fluidisasi relatif baik adalah pada suhu 1100 °C selama 2 jam. Kernel UO_2 yang di hasilkan mempunyai indek sintering sebesar 82,81% dengan densitas sebesar 9,99 g/ml, rasio O/U sebesar 2,03, struktur mikro adalah halus dan merata, bentuk butiran adalah bulat dengan diameter rata-rata sebesar 1100 μ m.

Kata kunci: Kernel UO_2 , fluidisasi, indeks sintering, rasio O/U

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF THE INDEXES OF SINTERING, MICROSTRUCTURE AND MORPHOLOGY OF UO_2 KERNEL SINTERED PRODUCT BY FLUIDIZATION. Characterization of the index of sintering, microstructure and morphology of UO_2 kernel sintered product by fluidization have been done. The aim this research was to knew the index of sintering, the microstructure and shape, the ratio of O/U and diameter of UO_2 kernel grains obtains because temperature and time changes at sintered by fluidization. A total of 2 g UO_2 of reduction product as a feed was placed on the container a graphite inside fluidized bed furnace and closed, then the air inside a furnace to losted with flowing of argon gas. The argon gas as the fluid was flowed from the bottom upwards through the grain of UO_2 kernel at a pressure of 2 bar with a flow rate of 33.3 ml/minute to happen fluidization process. Fluidization temperature at variations at 1000. 1050. 1100 and 1150 °C for 2 hours. With same way, the fluidization time at variation during at 1. 2. 3 and 4 hours at 1100 °C. The UO_2 kernel obtains were characterized the index of sintering using the equation Timmermans,

microstructure using SEM at 1000X magnification. The shape and diameter of UO_2 kernel grains using an optical microscopy at 50X magnification, and the ratio of O/U with gravimetric method. The experiment product showed that temperature and time of sintered by fluidization in fluid of argon gas was influence on sintering indexes, microstructure, morphology which includes the grains shape and grains diameter, and ratio of O/U of UO_2 kernel obtains. The sintering by fluidization is big relatively condition at 1100 °C for 2 hours. The UO_2 kernel obtains has generated the sintering index was 82.81%, the ratio of O/U amounted to 2.03, the microstructure to fine and uniform, grains shape is spherical with an average diameter of 1100 μm .

Keywords: *The UO_2 kernel, fluidization index of sintering, ratio of O/U.*

I. PENDAHULUAN

Kernel uranium dioksida (UO_2) keramik untuk elemen bakar reaktor suhu tinggi (High Thermal Reactor) dapat dibuat melalui proses sintering. Proses sintering kernel UO_2 dapat dilakukan secara fluidisasi yaitu proses kontak antara kernel UO_2 yang berbentuk butiran dengan fluida gas pada suhu tinggi. Proses ini dilakukan dengan menggunakan tungku pemanas (furnace) "Fluidized bed" dilingkungan gas inert seperti argon (Ar) sebagai fluida. Fluida gas argon dialirkan melalui dasar kolom pada tungku "fluidized bed", kemudian bergerak ke atas melalui hamparan butiran kernel UO_2 pada daerah berbentuk kerucut terbalik. Jika kecepatan aliran fluida gas argon kecil, gas argon akan mengalir melalui sela-sela butiran kernel UO_2 , kernel UO_2 tidak bergerak dan tinggi bed tetap sehingga fluidisasi belum terjadi. Jika kecepatan aliran fluida gas argon di berbesar terus, sampai gaya dorong keatas (gaya friksi) antara kernel UO_2 dan fluida gas argon sama dengan berat kernel UO_2 , maka mulailah kernel UO_2 bergerak menjadi suspensi dalam fluida. Pada keadaan ini kernel UO_2 mengalami fluidisasi minimum (minimum fluidization), dimana kernel UO_2 mulai terfluidisasi yang bersifat sama dengan fluida gas argon. Jika kecepatan aliran gas argon diperbesar sampai terjadi proses fluidisasi setimbang (smooth fluidization), gerakan (kontak) antara gas argon dengan kernel UO_2 dapat berlangsung dengan baik dan teratur. Selanjutnya jika kecepatan aliran

fluida gas argon diperbesar lagi akan terjadi fluidisasi tidak setimbang (bubbling fluidization), kernel UO_2 bergerak tidak beraturan dan saling bertumbukan satu sama lain sampai permukaan tungku *fluidized bed* (*Slugging fluidization*), kemudian jika kecepatan aliran fluida gas argon diperbesar lebih tinggi lagi, kernel UO_2 akan terbawa oleh fluida gas argon keluar dari tungku fluidized bed (lean phase fluidization)^[1,2].

Proses fluidisasi yang diharapkan adalah proses fluidisasi setimbang yang dapat diamati secara langsung pada fluidisasi simulator dari kernel UO_2 yang sama yang terletak di luar tungku fluidized bed. Pada proses sintering secara fluidisasi setimbang ini akan terjadi pemanasan yang merata pada semua sisi kernel UO_2 . Selama pemanasan terjadi pemampatan di ikuti penyusutan pori-pori dan perubahan porositas kernel UO_2 , sehingga akan berpengaruh pada sifat fisis yang lain diantaranya Indeks sintering (I_s). Indeks sintering adalah besarnya efisiensi kernel UO_2 yang di hasilkan selama proses sintering secara fluidisasi. Besarnya indeks sintering dapat di tentukan dengan menggunakan persamaan Timmermans^[3];

$$I_s = 1 - 1.98 P \quad (1)$$

P adalah porositas kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi. $P = 1 - Da/DT$. Substitusi harga porositas ke dalam persamaan 1, diperoleh modifikasi persamaan Timmermans, seperti berikut:

$$I_s = \frac{1.98Da - 0.98 DT}{DT} \times 100\% \quad (2)$$

Da adalah densitas kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi dan DT adalah densitas teoritis $10,96 \text{ g/ml}^{[4]}$. Persamaan 2 menunjukkan bahwa besarnya indeks sintering butiran kernel UO_2 berbanding langsung dengan densitas kernel UO_2 yang dihasilkan. Perubahan indeks sintering kernel UO_2 tersebut di pengaruhi oleh beberapa faktor di antaranya suhu dan waktu sintering. Pada suhu sintering lebih rendah, panas yang diterima oleh kernel UO_2 dan gas argon kecil sekali, akibatnya proses fluidisasi belum sempurna dan penyusutan pori-porinya kecil sehingga densitas kernel UO_2 yang di hasilkan kecil. Sedangkan pada suhu sintering lebih tinggi, panas yang diterima oleh kernel UO_2 dan gas argon berlebihan sehingga terjadi pelelehan kernel UO_2 di ikuti pembesaran volume pori-porinya (swelling) dan jumlah pori-pori kernel UO_2 bertambah, akibatnya terjadi penurunan densitas kernel UO_2 yang di hasilkan. Demikian juga waktu sintering. Pada waktu sintering terlalu cepat pada suhu optimum, panas yang diterima oleh kernel UO_2 dan gas argon tidak merata, proses fluidisasinya tidak sempurna sehingga densitas kecil. Pada waktu sintering terlalu lama, panas yang diterima oleh kernel UO_2 dan gas argon berlebihan sehingga terjadi pelelehan seperti diatas di ikuti pembesaran volume pori-porinya, akibatnya terjadi penurunan densitas kernel UO_2 yang dihasilkan. Hal ini akan berpengaruh pada indeks sintering, mikrostruktur dan morfologi yang meliputi bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 , dan rasio O/U kernel UO_2 . Abdel-Halim et al^[5], mempelajari perubahan suhu sintering kernel UO_2 dalam medium gas argon pada $1000-1400 \text{ }^\circ\text{C}$. Dari penelitian tersebut diperoleh bahwa suhu proses sintering kernel UO_2 yang relatif baik adalah pada suhu $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Pada kondisi ini proses sintering fluidisasi relatif sempurna, panas yang diterima oleh kernel UO_2 dan gas argon

merata pada semua sisi kernel UO_2 , terjadi penyusutan pori-pori kernel UO_2 dan pemampatannya sempurna. Kernel UO_2 yang dihasilkan mempunyai densitas sebesar $10,9 \text{ g/ml}$. Setelah disubstitusikan ke dalam persamaan 2 di atas diperoleh harga indeks sintering sebesar $98,92\%$. Balakrisna et al^[6], melaporkan bahwa proses sintering secara fluidisasi dalam medium fluida gas argon pada suhu $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ menghasilkan kernel UO_2 yang mempunyai densitas dan indek sintering lebih besar dari pada proses sintering secara fluidisasi dalam medium fluida gas hidrogen. Hal ini disebabkan gas argon bersifat inert dan tidak bereaksi dengan kernel UO_2 . Sedangkan gas hidrogen (H_2) adalah bersifat reduktor, dapat bereaksi dengan kernel UO_2 , sehingga terjadi perubahan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan, lebih kecil dari rasio O/U kernel UO_2 sebelum sintering fluidisasi. Densitas kernel UO_2 yang dihasilkan dapat di analisis dengan menggunakan Piknometer dan larutan tetra khlorida (CCl_4), Mikrostruktur kernel UO_2 dapat di analisis dengan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscopy*)^[7,8]. Rasio O/U kernel UO_2 dapat di analisis dengan metode gravimetri. Dimana kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi dioksidasi kembali dalam medium udara pada suhu $800 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam. Selama oksidasi terjadi reaksi kernel UO_2 dengan gas O_2 (udara) menjadi kernel U_3O_8 . Dari perubahan berat kernel UO_2 sebelum oksidasi dan berat kernel U_3O_8 hasil oksidasi serta molaritas oksigen dan uranium, dapat ditentukan besar rasio O/U. Sedangkan bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 dapat dianalisis dengan menggunakan mikroskop optik^[9,10]. Pada proses fluidisasi ini di gunakan gas argon sebagai fluida, karena termasuk gas inert, tidak bereaksi dengan kernel UO_2 , rasio O/U butiran kernel UO_2 yang difluidisasikan tidak mengalami perubahan. Sedangkan gas H_2 dapat bereaksi dengan kernel UO_2 sehingga terjadi perubahan rasio O/U pada kernel UO_2 yang di fluidisasikan.

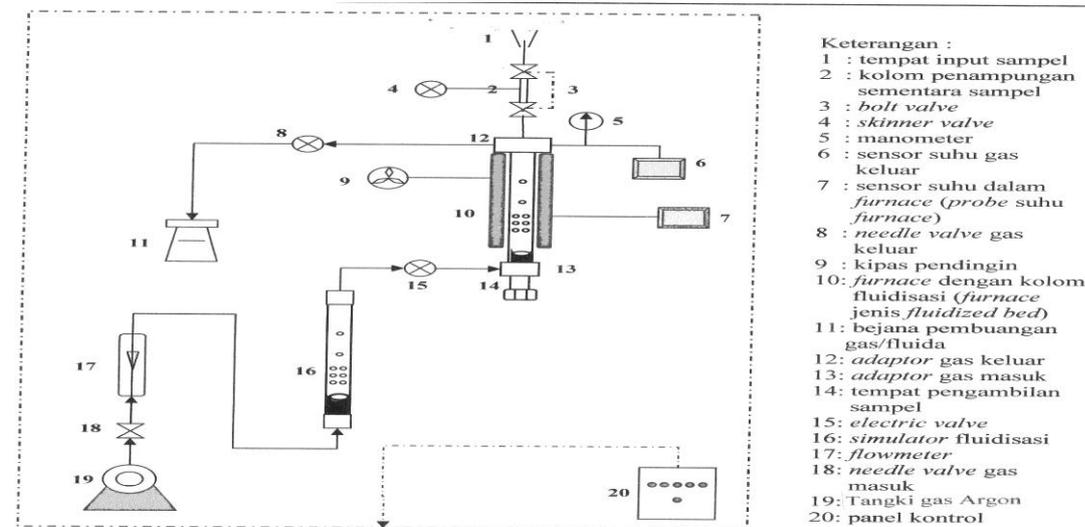
Tujuan penelitian ini adalah mengetahui indeks sintering, mikrostruktur dan morfologi yang meliputi bentuk dan diameter butiran, dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan karena perubahan suhu dan waktu proses sintering secara fluidisasi.

II. TATA KERJA

2.1. Bahan

Bahan yang digunakan terdiri dari kernel UO_2 hasil reduksi kernel U_3O_8 dengan gas H_2 dalam medium gas N_2 pada suhu $750\text{ }^\circ\text{C}$, tekanan 50 mmHg selama 2 jam. Kernel UO_2 ini mempunyai densitas $6,82\text{ g/ml}$ dan rasio O/U = 2,09 dan diameter butiran rata-rata $1200\text{ }\mu\text{m}$ yang berfungsi sebagai umpan proses sintering secara fluidisasi. Gas Argon Teknis, sebagai fluida gas pada proses sintering secara fluidisasi.

2.2. Alat



Gambar 1. Diagram alir proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 dalam medium fluida gas argon.

2.3. Cara kerja

1. Proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 hasil reduksi dalam fluida gas argon.

Proses sintering secara fluidisasi dilakukan dengan menggunakan tungku "fluidized bed", gas argon sebagai fluida dan kernel UO_2 hasil reduksi sebagai umpan. Sebanyak 2 g kernel UO_2 dimasukkan kedalam tungku fluidized bed dan diletakkan pada wadah grafit yang berbentuk kerujud,

Peralatan yang digunakan terdiri dari seperangkat alat tungku kalsinasi, sebagai tungku pemanas pada kalsinasi gel ADU menjadi kernel U_3O_8 dalam medium udara. Seperangkat alat tungku reduksi, sebagai tungku pemanas pada reduksi kernel U_3O_8 dengan gas H_2 menjadi kernel UO_2 . Seperangkat alat tungku "fluidized bed" yang mempunyai kapasitas suhu maksimum $1200\text{ }^\circ\text{C}$, sebagai tungku pemanas pada proses sintering secara fluidisasi. Seperangkat alat SEM, sebagai alat analisis mikrostruktur kernel UO_2 hasil. Seperangkat alat mikroskop optik (MO) tipe 150 Year-zeis untuk analisis bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 hasil.

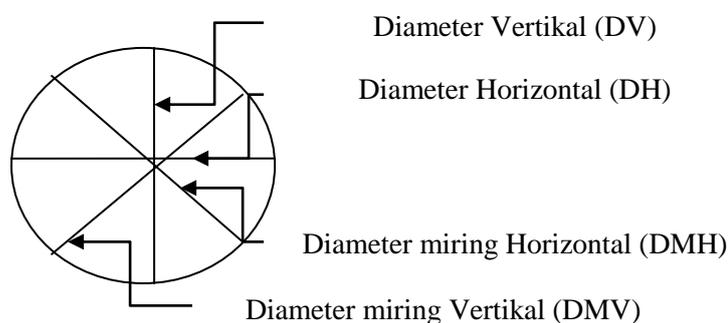
Alat proses sintering secara fluidisasi dapat dilihat pada Gambar 1 berikut,

teratur. Setelah itu suhu fluidisasi divariasi pada 1000, 1050, 1100 dan 1150 °C, masing-masing selama 2 jam, dan waktu fluidisasi divariasi selama 1, 2, 3 dan 4 jam, masing-masing pada suhu 1100 °C. Setelah proses fluidisasi selesai, kernel UO_2 yang dihasilkan dikeluarkan dari tungku fluidized bed dan kemudian dikarakterisasi:

- Besarnya indeks sintering ditentukan dengan menggunakan hasil modifikasi persamaan Timmermans di atas.

- Mikrostruktur dengan menggunakan SEM. morfologi yaitu bentuk dan diameter butiran kernel UO_2 menggunakan mikroskop optis.
- Tipe 150 Year-zeis, dan rasio O/U dengan metode gravimetri.

2. Cara pengukuran diameter butiran kernel UO_2 dengan mikroskop optik sistim dua dimensi pada pada pembesaran 50 kali.



Gambar 2. Skema pengukuran diameter butiran kernel UO_2 dengan mikroskop optik sistem dua dimensi.

Perhitungan:

$$\text{Diameter butiran (B) hasil pengukuran rata-rata} \\ = \frac{DH + DV + DMH + DMV}{4} \quad (3)$$

a. Diameter rata-rata (D)

$$= \frac{B \text{ (cm)}}{50} \times 10000 \frac{\mu\text{m}}{\text{cm}} \quad (4)$$

b. Rasio O/U

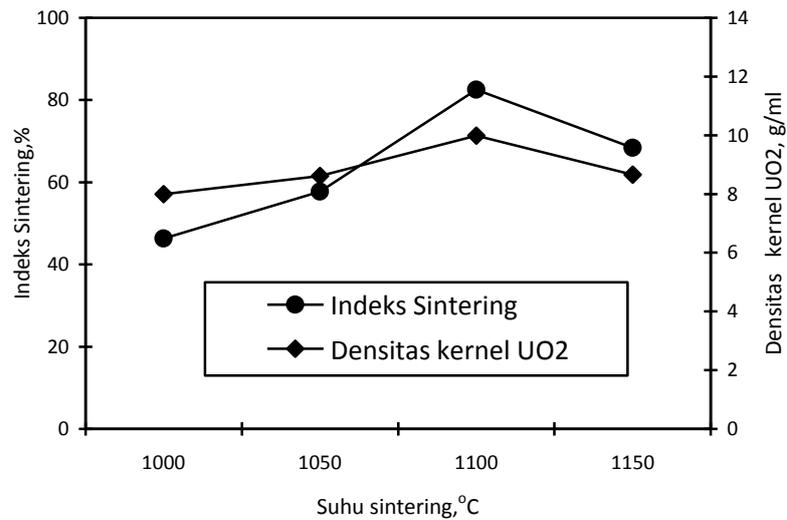
$$= \frac{a - 0.84 b}{\frac{BA O}{0.84 b}} \\ = \frac{0.84 b}{BA U} \quad (5)$$

- BA O = Berat atom oksigen, 16 g/mol.
BA U = Berat atom uranium, 238 g/mol.
a = Berat kernel UO_2 sebelum oksidasi, g
b = Berat kernel U_3O_8 hasil oksidasi, g

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Pengaruh suhu sintering secara fluidisasi kernel UO_2 dalam medium fluida gas argon.

Hasil penelitian pengaruh suhu proses sintering secara fluidisasi di sajikan pada Gambar 2 dan Tabel 1. Pada Gambar 2 ditunjukkan pengaruh suhu proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 dengan menggunakan tungku fluidized bed dan gas argon sebagai fluida terhadap perubahan Indeks sintering dan densitas kernel UO_2 .



Gambar 3. Pengaruh suhu proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon selama 2 jam dengan kecepatan alir 33,3 ml/menit terhadap perubahan indeks sintering Kernel UO_2 yang dihasilkan.

Proses sintering secara fluidisasi ini menggunakan bahan baku kernel UO_2 hasil reduksi pada suhu $750\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam yang mempunyai densitas sebesar $6,82\text{ g/ml}$. Pada Gambar 3 dapat di lihat bahwa proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 di lakukan pada suhu $1000\text{ }^\circ\text{C}$ sampai $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dalam fluida gas argon dengan kecepatan alir sebesar $33,3\text{ ml/menit}$. Pada kondisi ini terjadi penerimaan panas yang merata pada semua sisi butiran sehingga terjadi pemampatan serta penyusutan pori porinya di ikuti peningkatan densitas kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi dari $7,99\text{ g/m}$ sampai $9,99\text{ g/ml}$. Substitusi harga densitas kernel UO_2 ke dalam persamaan 2 di atas di peroleh harga indeks sintering pada suhu $1000\text{ }^\circ\text{C}$ sebesar $46,34\%$, pada suhu $1050\text{ }^\circ\text{C}$ sebesar $57,73\%$ dan pada suhu 1100

$^\circ\text{C}$ sebesar $82,48\%$. Sebaliknya pada suhu $1150\text{ }^\circ\text{C}$ terjadi penurunan densitas kernel UO_2 sebesar $8,66\text{ g/ml}$ sehingga indeks sintering kernel UO_2 turun menjadi $68,38\%$. Kondisi proses sintering secara fluidisasi yang relatif baik adalah pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dengan menghasilkan kernel UO_2 dengan indeks sintering sebesar $82,48\%$ dan densitas kernel UO_2 sebesar $9,99\text{ g/ml}$.

Pada Tabel 1 ditunjukkan pengaruh suhu proses sintering secara fluidisasi dalam medium fluida gas argon terhadap perubahan diameter butiran rata-rata dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan. Kernel UO_2 hasil reduksi yang digunakan sebagai umpan fluidisasi mempunyai rasio O/U sebesar $2,09$ dan diameter butiran rata-rata sebesar $1200\text{ }\mu\text{m}$.

Tabel 1. Pengaruh suhu pada proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon selama 2 jam dengan kecepatan alir 33,3 ml/menit terhadap perubahan diameter butiran rata-rata dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan.

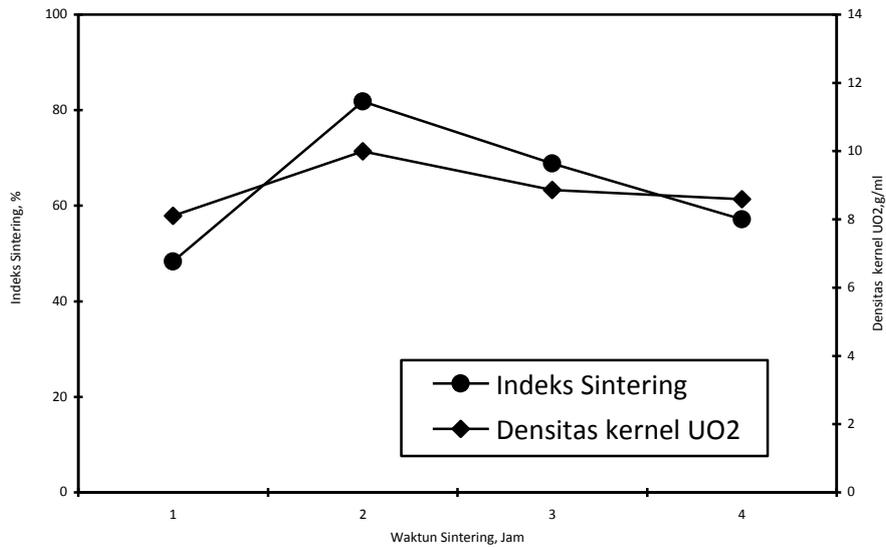
Suhu sintering (°C)	Diameter butiran rata-rata (μm)	Rasio O/U rata-rata
1000	1160	2,08
1050	1106	2,06
1100	1100	2,03
1150	1110	2,06

Dapat di lihat pada Tabel 1 bahwa pada proses sintering secara fluidisasi pada kondisi yang sama terjadi pirolisis sisa bahan anorganik dan organik dalam butiran menjadi gas kemudian keluar melalui tungku Fluidized bed. Pada kondisi ini terjadi perubahan volume butiran di ikuti perubahan diameter butiran dan rasio O/U kernel UO_2 yang di hasilkan. Pada proses sintering secara fluidisasi pada suhu 1000 °C sampai 1100 °C terjadi penyusutan diameter butiran rata-rata sebesar sebesar 3,33 % sampai 8,33 % terhadap diameter butiran kernel UO_2 hasil reduksi, demikian juga rasio O/U kernel UO_2 terjadi penurunan sebesar 0,48 % sampai 2,87% terhadap rasio O/U kernel hasil reduksi. Sedangkan pada suhu 1150 °C terjadi kenaikan diameter butiran kernel UO_2 rata-rata sebesar 0,11 % terhadap diameter butiran kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi pada suhu 1100 °C, dan kenaikan rasio O/U kernel UO_2 sebesar 1,47% terhadap rasio kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi pada suhu 1100 °C. Perubahan dan kenaikan diameter butiiran kernel UO_2 tersebut disebabkan

karena terjadi pembesaran volume butiran (swelling) dan sintering parsial selama proses sintering secara fluidisasi sehingga diameter butiran menjadi lebih besar. Sedangkan kenaikan rasio O/U disebabkan terjadi resapan (absorpsi) oksigen dari udara melalui pori-pori kernel UO_2 yang cukup besar selama penyimpanan. Setelah itu oksigen tersebut mengoksidasi molekul UO_2 selama rekalsinasi pada suhu 800 °C selama 4 jam sehingga terjadi peningkatan jumlah oksigen pada molekul UO_2 , akibatnya terjadi kenaikan rasio O/U kernel UO_2

3.2. Pengaruh waktu pada proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 dalam fluida gas argon.

Hasil penelitian pengaruh waktu pada proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 , disajikan pada Gambar 4 dan Tabel 2. Pada Gambar 4 ditunjukkan pengaruh waktu proses sintering secara fluidisasi kernel UO_2 hasil reduksi dalam fluida gas argon terhadap perubahan indeks sintering kernel UO_2 yang di hasilkan.



Gambar 4. Pengaruh waktu pada proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ dengan kecepatan aliran $33,3\text{ ml/menit}$ terhadap perubahan indeks sintering kernel UO_2 yang dihasilkan.

Pada Gambar 4 dapat di lihat bahwa proses sintering secara fluidisasi butiran kernel UO_2 di lakukan pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 1 jam sampai 2 jam dalam fluida gas argon dengan kecepatan alir sebesar $33,3\text{ ml/menit}$. Pada kondisi ini terjadi penerimaan panas yang merata pada semua sisi butiran sehingga terjadi pemampatan dan penyusutan pori-porinya diikuti peningkatan densitas kernel UO_2 yang di hasilkan dari $8,10\text{ g/m}$ sampai $9,99\text{ g/ml}$. Substitusi harga densitas kernel UO_2 ke dalam persamaan 2 di atas diperoleh harga Indeks sintering pada waktu fluidisasi selama 1 jam sebesar $48,34\%$ dan pada waktu fluidisasi selama 2 jam sebesar $81,82\%$. Sebaliknya pada proses sintering kernel UO_2 secara fluidisasi selama 3 jam sampai 4 jam terjadi peningkatan suhu dalam alat fluidized bed dan proses sintering parsial

pada kernel UO_2 , sehingga terjadi pembesaran volume pori-pori (swelling) dan jumlah pori pori butiran bertambah, akibatnya densitas kernel UO_2 turun menjadi $8,86\text{ g/ml}$ sampai dengan $8,59\text{ g/ml}$, dengan demikian indeks sintering kernel UO_2 juga turun menjadi $68,85\%$ sampai $57,16\%$. Kondisi proses sintering secara fluidisasi yang relatif baik juga pada $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dengan menghasilkan kernel UO_2 dengan indeks sintering sebesar $82,48\%$ dan densitas kernel UO_2 sebesar $9,99\text{ g/ml}$.

Pada Tabel 2 ditunjukkan pengaruh waktu proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon dengan menggunakan umpan yang sama terhadap perubahan diameter butiran rata-rata dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan.

Tabel 2. Pengaruh waktu pada proses sintering secara fluidisasi dalam argon sebagai fluida pada suhu 1100 °C dengan kecepatan alir 33,3 ml/menit terhadap perubahan diameter butiran rata-rata dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan.

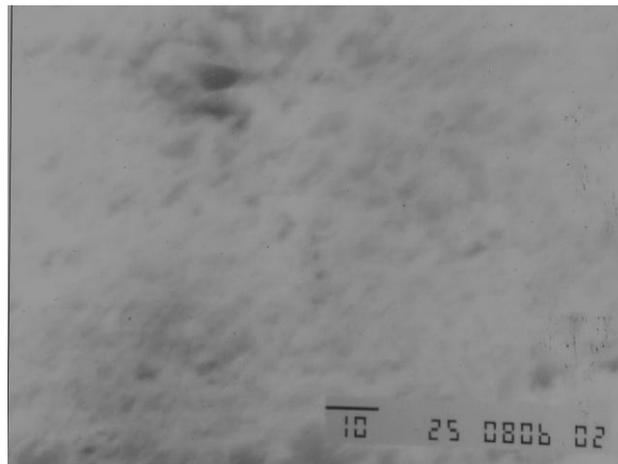
Waktu sintering (Jam)	Diameter butiran Rata-rata (μm)	Rasio O/U
1	1142	2,07
2	1100	2,03
3	1140	2,05
4	1150	2,08

Dapat dilihat pada Tabel 2 bahwa pada proses sintering secara fluidisasi selama 1 jam sampai 2 jam pada suhu 1100 °C terjadi pirolisis senyawa anorganik dan organik dalam butiran menjadi gas kemudian keluar melalui tungku fluidized bed. Pada kondisi ini terjadi penyusutan volume butiran diikuti perubahan diameter butiran rata-rata dan rasio O/U kernel UO_2 yang dihasilkan. Pada proses sintering secara fluidisasi selama 1 jam sampai 2 jam pada suhu 1100 °C terjadi penyusutan diameter butiran rata-rata sebesar 4,83% sampai 8,33% terhadap diameter butiran kernel UO_2 hasil reduksi, demikian juga rasio O/U kernel UO_2 turun sebesar 0,96% sampai 2,87% terhadap rasio O/U kernel UO_2 hasil reduksi. Pada waktu fluidisasi selama 3 jam sampai 4 jam pada suhu 1100 °C terjadi kenaikan diameter butiran rata-rata kernel UO_2 sebesar 3,64% sampai 4,54% terhadap diameter butiran rata-rata kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi selama 2 jam, dan kenaikan rasio O/U butiran kernel UO_2 sebesar 2,46% sampai 3,94% terhadap rasio O/U kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi selama 2 jam.

Perubahan dan kenaikan diameter butiran kernel UO_2 tersebut disebabkan selama proses sintering secara fluidisasi terjadi pembesaran volume butiran kernel UO_2 (swelling) dan sintering parsial selama proses sintering secara fluidisasi sehingga diameter butiran menjadi lebih besar. Sedangkan kenaikan rasio O/U disebabkan terjadi resapan (absorpsi) oksigen dari udara melalui pori-pori kernel UO_2 cukup besar selama penyimpanan. Setelah itu oksigen tersebut mengoksidasi molekul UO_2 selama rekalsinasi pada suhu 800 °C selama 4 jam sehingga terjadi peningkatan jumlah oksigen pada molekul UO_2 , akibatnya terjadi kenaikan rasio O/U kernel UO_2 .

3.3. Hasil analisis mikrostruktur kernel UO_2 pada berbagai suhu dan waktu proses sintering secara fluidisasi.

Analisis mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi pada berbagai suhu dan waktu dengan menggunakan SEM pada pembesaran 1000X, disajikan pada Gambar 4, 5 dan 6.



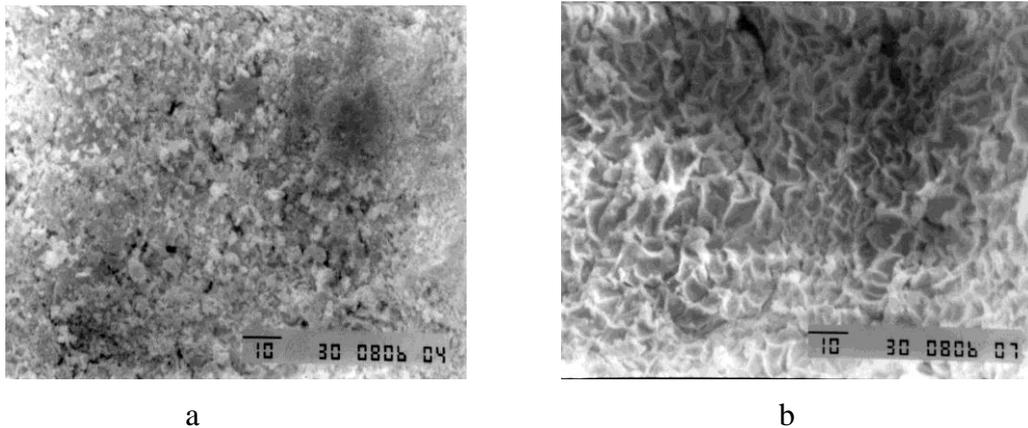
Gambar 5. Mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dalam fluida gas argon.

Pada Gambar 5 di tunjukkan bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Kernel UO_2 ini mempunyai densitas sebesar $9,99\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $81,82\%$, rasio O/U sebesar $2,03$, diameter butiran rata-rata sebesar $1100\text{ }\mu\text{m}$ dan permukaannya teratur dan halus. Pada kondisi ini akumulasi panas di permukaan kernel UO_2 selama fluidisasi relatif sempurna sehingga penyusutan pori-pori padatan dan densifikasinya relatif merata. Sedangkan lubang kecil pada permukaan kernel UO_2 tersebut adalah sisa dari hasil penyusutan padatan selama pemanasan. Menurut Abdel Halim^[5], Smann^[7] dan Vanvlack^[8], proses sintering secara fluidisasi dapat berlangsung sempurna pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Kernel UO_2 yang di hasilkan mempunyai mikrostruktur yang teratur dan pori-pori relatif kecil. Hal ini berbeda dengan kernel UO_2 hasil fluidisasi pada suhu lebih kecil atau lebih besar dari suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$.

Pada Gambar 6 di tunjukkan bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon pada suhu lebih kecil atau lebih besar

dari suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam. Pada Gambar 6.a ditunjukkan bahwa bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi pada suhu $1000\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dalam fluida gas argon yang mempunyai densitas sebesar $7,99\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $46,34\%$, rasio O/U sebesar $2,08$, diameter butiran rata-rata sebesar $1160\text{ }\mu\text{m}$, permukaannya relatif kasar dan tidak teratur, terdapat pori-pori lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada proses sintering secara fluidisasi tersebut terjadi perubahan fasa dalam padatan dari amorph menjadi kristal kernel UO_2 .

Pada Gambar 6.b dapat dilihat bahwa bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi pada suhu $1150\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dalam fluida gas argon yang mempunyai densitas sebesar $8,66\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $68,38\%$, rasio O/U sebesar $2,06$, diameter butiran rata-rata sebesar $1110\text{ }\mu\text{m}$ dan permukaannya tidak teratur. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi panas yang diterima oleh padatan selama fluidisasi relatif lebih besar sehingga terjadi pembesaran volume padatan (*swelling*) dan keretakan serta pengerutan dipermukaan kristal kernel UO_2 tersebut.

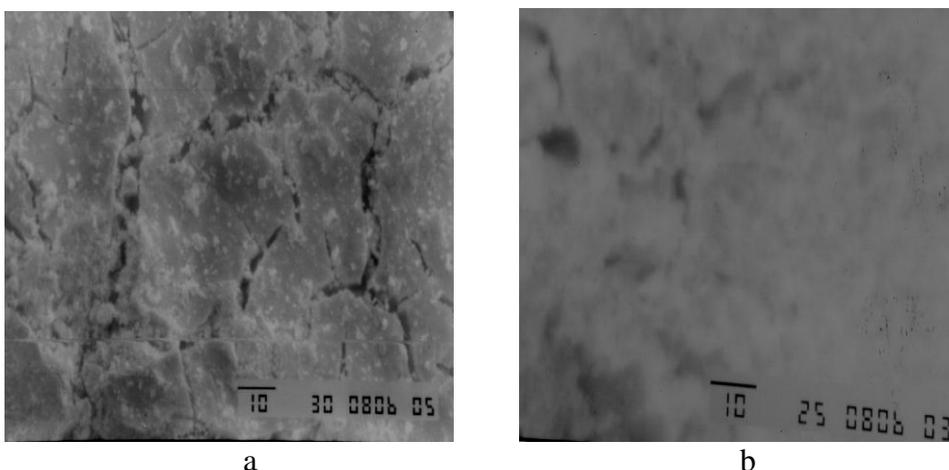


Gambar 6. Mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi pada suhu $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (a) dan $1150\text{ }^\circ\text{C}$ (b) selama 2 jam dalam fluida gas argon.

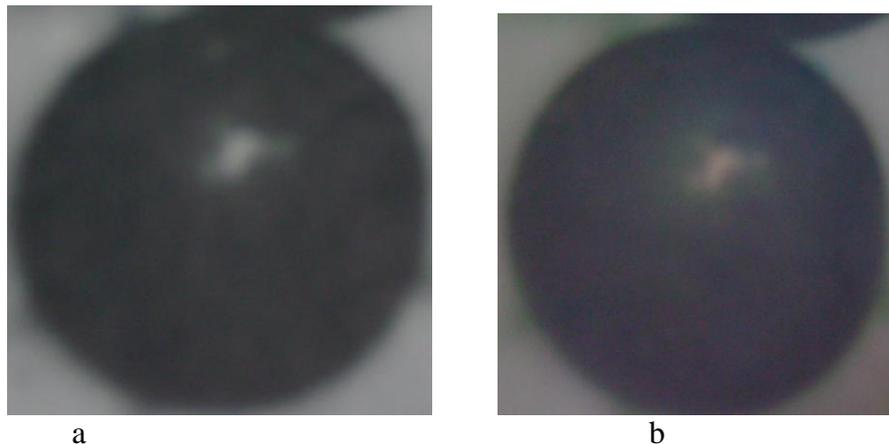
Pada Gambar 7 di tunjukkan bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon selama 1 jam dan 3 jam pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Pada Gambar 7.a di tunjukkan bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon selama 1 jam pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ yang mempunyai densitas sebesar $8,10\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $48,34\%$, rasio O/U sebesar $2,07$, diameter butiran sebesar $1142\text{ }\mu\text{m}$ dan pori-pori relatif besar. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi ini panas yang diterima oleh kernel UO_2 selama proses sintering secara fluidisasi relatif kecil dan tidak cukup untuk mengatur perubahan pori-

pori padatan sehingga perubahan porinya tidak sempurna.

Pada Gambar 7.b di tunjukkan bentuk mikrostruktur kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi dalam medium fluida gas argon selama 3 jam pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ yang mempunyai densitas sebesar $8,86\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $68,86\%$, rasio O/U sebesar $2,05$, diameter butiran sebesar $1140\text{ }\mu\text{m}$ dan pori-pori relatif kecil. Hal ini menunjukkan bahwa akumulasi panas yang diterima oleh kernel UO_2 selama sintering secara fluidisasi relatif lama sehingga terjadi pembesaran volume padatan dan pembentukan kembali pori-pori di permukaan butiran kernel UO_2 tersebut.



Gambar 7. Mikrostruktur kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi selama (a) 1 jam dan (b) 3 jam pada suhu $1100\text{ }^\circ\text{C}$ dalam fluida gas argon.



Gambar 8. (a) Bentuk butiran kernel UO_2 hasil reduksi (a), dan (b) bentuk butiran kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi

3.4. Hasil analisis morfologi kernel UO_2 hasil reduksi dan kernel UO_2 hasil proses sintering secara fluidisasi dalam medium fluida gas argon.

Hasil analisis bentuk butiran kernel UO_2 hasil reduksi dan kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi yang diamati dengan menggunakan mikroskop optik (MO) tipe 150 Year-zeis pada pembesaran 50 X, disajikan pada Gambar 8.a dan 8.b. Pada Gambar 8.a ditunjukkan bentuk butiran kernel UO_2 hasil reduksi kernel U_3O_8 dengan gas H_2 pada suhu 750°C selama 2 jam yang mempunyai densitas sebesar $6,82\text{ g/ml}$, diameter sebesar $1200\ \mu\text{m}$, rasio O/U sebesar 2,09. Bentuk butirannya bulat berwarna hitam dari molekul UO_2 yang terbentuk selama reaksi reduksi antara kernel U_3O_8 dengan H_2 pada suhu 750°C selama 2 jam. Pada Gambar 8.b ditunjukkan bentuk butiran kernel UO_2 hasil sintering secara fluidisasi pada 1100°C selama 2 jam. Butiran kernel UO_2 ini mempunyai densitas sebesar $9,99\text{ g/ml}$, indeks sintering sebesar $81,82\%$, rasio O/U sebesar 2,03, dan diameter rata-rata sebesar $1100\ \mu\text{m}$. Bentuk butirannya bulat berwarna hitam kecoklatan dari molekul UO_2 yang terbentuk selama proses sintering secara fluidisasi.

IV. KESIMPULAN

Dari hasil percobaan dan pembahasan diatas dapat di simpulkan sebagai berikut:

Suhu dan waktu sintering secara fluidisasi dalam fluida gas argon berpengaruh terhadap perubahan indeks sintering, mikrostruktur dan Morfologi yang meliputi bentuk, diameter butiran kernel UO_2 , dan rasio O/U kernel UO_2 yang di dihasilkan. Kondisi sintering secara fluidisasi relatif baik adalah pada suhu 1100°C selama 2 jam. Kernel UO_2 yang di dihasilkan mempunyai indek sintering sebesar $82,81\%$ dengan densitas sebesar $9,99\text{ g/ml}$, rasio O/U sebesar 2,03, struktur mikro adalah halus dan merata, bentuk morfologi kernel UO_2 adalah bulat dengan diameter rata-rata sebesar $1100\ \mu\text{m}$.

V. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan pada saudara Bambang Kuncoro, mahasiswa Fakultas Teknik UGM jurusan Teknik Fisika, Program studi Teknologi Nuklir dan Staf kelompok TPBB yang telah banyak membantu sampai penelitian ini dapat diselesaikan

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Rohanda, A., (2005), Pengaruh Kalsinasi Dalam Furnace Jenis Fluidized Bed

- Terhadap Kualitas Kernel U_3O_8 , Skripsi program S-1 Teknik Nukir, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas Teknik UGM, Yogyakarta
2. Kuncoro, B., (2006), Pengaruh Suhu Dan Waktu Sintering Terhadap Kualiltas Kernel UO_2 Dalam Furnace Jenis Fluidized Bed., Skripsi program S-1 Teknik nuklir, Jurusan Teknik Fisika, Fakultas teknik UGM, Yogyakarta
 3. Bishay, A.F. and El-Fekey,S.A., (1984) Short Note: Sintering Characteristic of some Uranium Oxide pellet, Powder Metallurgy International,Vol 16.No. 2, 81-82
 4. Brey, I., Fakuda, K., Harson, D.L., Moman, R., Khoulr, A., (1997), Fuel Performance and Fission Product Behavior in Gas Cooled Reactor, IAEA – TECDOC- 987, 3-43, Vienna
 5. Abdel-Halim., Alifi.Y.K, El-Adham, K.A, (1987), Fabication of UO_2 Micro Spheres by Hydrolysis Process., Metallurgy Departement Nuclear Research Centre, AEC Cairo, Egypt.Powder Metallurgy International. Vol.19.No 5, 22-26.
 6. Balakrishna, P., Varma, B.P., Krishnann. T.S., Mohan, T.R.R. and Ramakrishnan, (1986), The Role of Point Defects in Sintering UO_2 and ThO_2 , Transactions of the PMAI, Vol.13, 117-122
 7. Smann, H., Dorr, W and Peeh, M., (1986), Control of UO_2 Microstructure by Oxidative Sintering, Journal of Nuclear Materials, Nort-Holland, Amsterdam, 1401-6.
 8. Van Vlack, L.H., Djaprie, S., (1991), Ilmu dan Teknologi Bahan., Edisi pertama, Penerbit Erlangga, Jakarta, 225-551
 9. ASTM., (1966), Standar Specification for Sintered Uranium Dioxide Pellet, ASTM C 77, 19 516-520
 10. Lay, K.W. and Carter, R.E., (1969), Role of the O/U ratio on the sintering of UO_2 , Journal of nuclear material. Nort-Holland, Amsterdam, 30, 74-87.