

# **PENETAPAN PARAMETER PROSES PEMBUATAN BAHAN BAKAR $UO_2$ SERBUK HALUS YANG MEMENUHI SPESIFIKASI BAHAN BAKAR TIPE PHWR**

**Abdul Latief**

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN  
Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten  
*e-mail: abtief@yahoo.com*

(Diterima 22-3-2010, disetujui 23-4-2010)

## **ABSTRAK**

**PENETAPAN PARAMETER PROSES PEMBUATAN BAHAN BAKAR  $UO_2$  SERBUK HALUS YANG MEMENUHI SPESIFIKASI BAHAN BAKAR TIPE PHWR.** Telah dilakukan pembuatan pelet  $UO_2$  untuk bahan bakar tipe PHWR dengan parameter proses meliputi tekanan pengompakan 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup> dan suhu sinter 1000 – 1200 °C dengan laju pemanasan 250 °C/jam dan waktu sinter 3 jam dalam suasana gas argon. Tujuannya adalah untuk mendapatkan tekanan pengompakan dan suhu sinter yang optimum sehingga bahan bakar tersebut memenuhi spesifikasi bahan bakar  $UO_2$  yang telah ditetapkan. Lingkup kegiatan penetapan parameter proses pembuatan bahan bakar  $UO_2$  tipe PHWR mencakup pengompakan pelet  $UO_2$  dari serbuk halus pada tekanan 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup> dan sintering pelet  $UO_2$  pada suhu 1000 – 1200 °C dengan laju pemanasan tetap yakni 250 °C/jam dan waktu sinter 3 jam. Metode yang dipakai untuk menetapkan tekanan pengompakan dan suhu sinter yang tepat adalah melalui penentuan densitas pelet  $UO_2$  hasil pengompakan pada tekanan yang bervariasi, densitas pelet sinter pada tekanan pengompakan dan variasi suhu sinter, diameter butir pelet  $UO_2$  hasil sinter dengan mikroskop optik dan SEM, dan rasio O/U pelet  $UO_2$  hasil sinter. Data yang diperoleh kemudian dikorelasikan dengan spesifikasi bahan bakar yang telah ditetapkan untuk mendapatkan tekanan pengompakan dan suhu sinter yang optimum. Hasil menunjukkan bahwa parameter proses pembuatan bahan bakar  $UO_2$  tipe PHWR dari serbuk halus 38 – 75  $\mu m$  yang memenuhi spesifikasi densitas pelet sinter 95% densitas teoritis, diameter butir pelet sinter 6 – 8  $\mu m$ , dan rasio O/U 2,00  $\pm$  0,015 adalah tekanan pengompakan 4,10 dan 4,68 ton/cm<sup>2</sup> dan suhu sinter 1200 °C pada laju pemanasan 250 °C/jam dan waktu sinter 3 jam.

**KATA KUNCI:** bahan bakar  $UO_2$ , PHWR

## **ABSTRACT**

**DETERMINATION OF PROCESS PARAMETERS FOR PREPARING  $UO_2$  FUEL FROM FINE POWDER THAT SATISFIES PHWR FUEL SPECIFICATIONS.** Preparation of  $UO_2$  pellets of PHWR type has been performed with process parameters comprising compacting pressures of 2.93 – 5.27 ton/cm<sup>2</sup> and sintering temperatures of 1000 – 1200 °C with a heating rate

of 250 °C/h and sintering time of 3 h in an argon atmosphere. The objective was to obtain the optimum compacting pressure and sintering temperature in order to satisfy the specifications established for  $UO_2$  fuel. The scope of the determination of the process parameters for preparing  $UO_2$  pellets of PHWR type involved compacting  $UO_2$  pellets from fine powder at pressures of 2.93 – 5.27 ton/cm<sup>2</sup>, and sintering  $UO_2$  pellets at temperatures of 1000 – 1200 °C with a fixed heating rate of 250 °C/h and sintering time of 3 h. The method employed to acquire the correct compacting pressure and sintering temperature was by determining the density of  $UO_2$  pellets obtained at different compacting pressures, the density of sintered  $UO_2$  pellets obtained at the corresponding compacting pressure and varied sintering temperatures, the grain diameter of sintered  $UO_2$  pellets using optical microscopy and SEM, and the O/U ratio of sintered  $UO_2$  pellets. The data were then correlated with the fuel specifications to establish the optimum compacting pressure and sintering temperature. The results showed that the process parameters for preparing  $UO_2$  fuel of PHWR type from fine powder of 38 – 75 μm that meets the specifications of sintered pellet density of 95% theoretical density, grain diameter of sintered pellet of 6 – 8 μm, and O/U ratio of  $2.00 \pm 0.015$  were compacting pressures of 4.10 and 4.68 ton/cm<sup>2</sup> and sintering temperature of 1200 °C with a heating rate of 250 °C/h and sintering time of 3 h.

FREE TERMS:  $UO_2$  fuel, PHWR

## I. PENDAHULUAN

Bahan bakar  $UO_2$  merupakan bahan bakar utama untuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) tipe reaktor berpendingin air ringan seperti *Pressurized Water Reactor* (PWR) atau tipe reaktor berpendingin air berat seperti *Pressurized Heavy Water Reactor* (PHWR)<sup>[1]</sup>. Dalam pembuatan bahan bakar  $UO_2$  untuk PHWR, khususnya tipe CANDU, diperlukan tahapan proses yaitu penyiapan serbuk  $UO_2$ , pra-kompaksi, penghancuran pelet menjadi serbuk  $UO_2$ , pengompakan pelet  $UO_2$ , sintering dan *finishing*<sup>[2]</sup>.

Permasalahan utama dalam pembuatan bahan bakar  $UO_2$  adalah variasi tekanan pengompakan dan suhu sinter, dimana keduanya saling mempengaruhi. Tekanan pengompakan akan berdampak pada hasil sintering sehingga kualitas pelet  $UO_2$  akhir sangat tergantung pada densitas pelet awal, meski parameter sintering juga mempengaruhi kualitas pelet sinter<sup>[3]</sup>. Sedangkan kualitas pelet sinter yang ditetapkan adalah densitas pelet sinter  $UO_2$  95% densitas teoritis (TD, *Theoretical Density*), diameter butir 6 – 8 μm dan rasio O/U sebesar  $2,00 \pm 0,015$ .

Pembuatan pelet sinter  $UO_2$  yang telah dilakukan di antaranya pelet  $UO_2$  dari serbuk ukuran 150 – 1000 μm murni atau dicampur dengan aditif

10%  $\text{U}_3\text{O}_8$ , 4%  $\text{TiO}_2$ , atau lainnya. Penambahan aditif tersebut dimaksudkan untuk memperbaiki kualitas pelet  $\text{UO}_2$  sinter atau dalam rangka efisiensi ekonomi karena suhu proses dapat diturunkan sampai beberapa ratus derajat. Dalam pembuatan pelet tersebut di atas, tekanan pengompakan dan suhu sinter sangat mempengaruhi kualitas pelet  $\text{UO}_2$  yang dihasilkan. Tekanan pengompakan berkisar antara 2,50 – 5,00  $\text{ton/cm}^2$  dan suhu sinter berkisar antara 1500 – 1700  $^\circ\text{C}$ <sup>[3]</sup>.

Percobaan lain yang telah dilakukan adalah pembuatan bahan bakar  $\text{UO}_2$  berbutir antara 150 – 1000  $\mu\text{m}$  dengan ditambah racun dapat bakar (*burnable poison*) seperti  $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$  dan  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  dalam jumlah relatif kecil yaitu di bawah 5%. Tujuan penambahan racun dapat bakar adalah untuk memperbaiki reaktivitas bahan bakar dalam reaktor serta memperbaiki kualitas pelet yang dihasilkan<sup>[4]</sup>. Parameter proses yang mempengaruhi di antaranya tekanan pengompakan, suhu sinter, waktu sinter dan laju pemanasan sintering. Tekanan pengompakan berkisar antara 2,50 – 5,00  $\text{ton/cm}^2$ , dan suhu sinter antara 1500 – 1700  $^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>. Dalam pembuatan bahan bakar tersebut di atas, spesifikasi yang diharapkan adalah densitas pelet mentah  $\text{UO}_2$  antara 50 – 56% TD, densitas pelet sinter  $\text{UO}_2$  95% TD, diameter butir pelet  $\text{UO}_2$  antara 6 – 8  $\mu\text{m}$  dan rasio O/U  $2,00 \pm 0,015$ .

Pengompakan juga dilakukan terhadap  $\text{UO}_2$  berdiameter butir di bawah 150  $\mu\text{m}$  dan di atas 1000  $\mu\text{m}$  pada tekanan 2,50 – 5,00  $\text{ton/cm}^2$ , sintering pada suhu 1500 – 1700  $^\circ\text{C}$  dengan spesifikasi pelet sinter  $\text{UO}_2$  yang diinginkan memiliki densitas 95% TD, diameter butir 6 – 8  $\mu\text{m}$ , rasio O/U  $2,00 \pm 0,015$ . Namun hasil pelet yang diperoleh kurang baik karena pelet yang dihasilkan sering pecah, terutama pada tekanan rendah<sup>[3]</sup>.

Dalam penelitian untuk menetapkan parameter proses pengompakan dan sintering  $\text{UO}_2$  dari serbuk halus antara 38 – 75  $\mu\text{m}$  dengan komposisi butir <38 mikron sebesar 30 – 35%; antara 38 – 53  $\mu\text{m}$  sebesar 25 – 30%; antara 53 – 63  $\mu\text{m}$  sebesar 30 – 35%; dan antara 63 – 75  $\mu\text{m}$  sebesar 7 – 10%. Kemudian serbuk dikompaksi dengan tekanan pengompakan 2,93 – 5,27  $\text{ton/cm}^2$  dan disinter pada suhu 1000 – 1200  $^\circ\text{C}$  dengan waktu sinter 3 jam dan laju pemanasan 250  $^\circ\text{C/jam}$  dalam lingkungan gas argon. Sintering terhadap serbuk halus  $\text{UO}_2$  dalam kondisi gas argon memungkinkan suhu sinter dapat diturunkan menjadi sekitar 1200  $^\circ\text{C}$ <sup>[5]</sup>. Kemudian ditetapkan spesifikasi pelet  $\text{UO}_2$  sinter sama seperti spesifikasi dalam lingkungan gas hidrogen, yaitu densitas pelet sinter 95% TD, diameter butir 6 – 8  $\mu\text{m}$ , dan rasio O/U  $2,00 \pm 0,015$ . Untuk mendapatkan spesifikasi tersebut, maka tekanan

pengompakan dan suhu sinter divariasikan, untuk selanjutnya menetapkan parameter proses yang optimum.

Jika tekanan pengompakan divariasikan antara 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup>, diharapkan densitas pelet yang diperoleh mengalami kenaikan seiring dengan naiknya tekanan pengompakan. Namun pada tekanan tertentu densitas akan menurun sejalan dengan naiknya tekanan pengompakan. Hal ini terjadi karena adanya tegangan sisa akibat pengompakan berlebih sehingga pelet rusak, retak dan atau pecah. Hasil pengompakan yang optimum atau densitas pelet yang tinggi yang diperoleh tidak harus sejalan dengan naiknya densitas pelet sinter. Hal ini dikarenakan adanya kemungkinan untuk terjadi pergeseran karena adanya pembatasan tekanan pengompakan. Sedangkan variasi suhu sinter sangat mempengaruhi densitas pelet sinter, besar butir dan rasio O/U. Sintering sampai suhu tertentu akan menyebabkan densitas naik sejalan dengan kenaikan suhu sampai batas tertentu, dan kenaikan suhu juga mempengaruhi besar butir dan rasio O/U pelet sinter. Dengan demikian, tekanan pengompakan dan suhu sinter perlu diketahui secara pasti agar pembuatan bahan bakar ini efisien guna mendapatkan hasil yang memenuhi spesifikasi yang telah ditetapkan.

Untuk memperoleh pelet UO<sub>2</sub> yang diinginkan, maka perlu dilakukan pendekatan penyelesaian, di antaranya pembuatan pelet UO<sub>2</sub> dengan variasi tekanan (P) dan suhu (T) yang kemudian diuji dengan melakukan pengukuran densitas pelet mentah/sinter dengan metode gravimetri, pengamatan mikrostruktur dengan mikroskop optik dan SEM (*Scanning Electron Microscope*). Sedangkan perhitungan besar butir dilakukan dengan metode Heyn dan pengukuran rasio O/U dengan metode gravimetri. Kemudian data uji yang ada digunakan untuk membuat grafik pengaruh parameter proses terhadap kualitas hasil seperti densitas pelet mentah/sinter, besar butir, dan rasio O/U. Dari sini akan ditetapkan parameter optimum yang memenuhi spesifikasi produk sesuai dengan yang telah ditetapkan dengan cara matematis (penjumlahan grafik).

## II. TATA KERJA

Bahan yang dipakai dalam penelitian adalah serbuk halus UO<sub>2</sub> dengan ukuran antara 38 – 75 µm, seng stearat, dan gas argon. Peralatan yang digunakan di antaranya *miconizer*, *mixer*, alat pengompak serbuk, tungku sinter, *microhardness tester*, timbangan, sketmat, mikroskop optik dan SEM.

Pada awalnya UO<sub>2</sub> dihaluskan dengan alat *miconizer*, kemudian diambil butir yang berdiameter antara 38 – 75 µm dengan komposisi butir 38 µm sebesar 30 – 35%; 38 – 53 µm sebesar 25 – 30%; 53 – 63 µm sebesar

30 – 35%; dan 63 – 75  $\mu\text{m}$  sebesar 7 – 10%. Serbuk kemudian dicampur dengan seng stearat sebanyak 0,2% dalam *mixer* yang diputar selama 30 menit, dikompaksi menjadi pelet pada tekanan 2,93 – 5,27  $\text{ton/cm}^2$ , disinter dalam tungku sinter pada suhu antara 1000 – 1200  $^{\circ}\text{C}$ , dimana laju kenaikan suhu dibuat tetap yaitu 250  $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$  dengan waktu sinter 3 jam dalam suasana gas argon. Terhadap hasil yang diperoleh, dilakukan pengukuran densitas untuk  $UO_2$  mentah/sinter, pengamatan mikroskop optik untuk mengetahui besar butir dengan metode Heyn dan uji kekerasan, dan pengukuran rasio O/U dengan metode gravimetri.

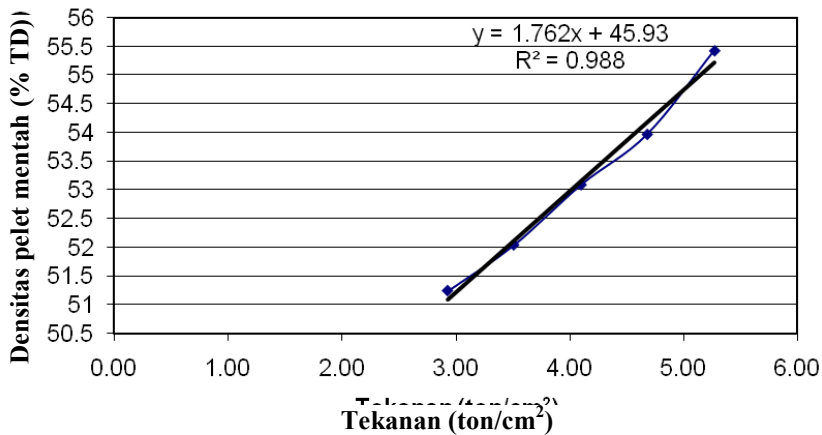
Optimasi parameter proses pengompakan dan sintering dilakukan dengan membandingkan hasil uji (densitas pelet mentah/sinter, besar butir, kekerasan dan rasio O/U) dengan spesifikasi yang sudah ditetapkan, kemudian dijumlahkan secara matematis (penjumlahan).

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 1, 2, 3, 4, 5 atau Gambar 1, 2, 3, 4, 5, yang meliputi besaran densitas pelet mentah, densitas pelet sinter, besar butir, kekerasan dan rasio O/U.

#### 3.1. Optimasi Tekanan Pengompakan

Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah  $UO_2$  dapat dilihat pada Gambar 1. Terlihat bahwa kenaikan tekanan pengompakan sejalan dengan kenaikan densitas pelet  $UO_2$  mentah yang dihasilkan. Tekanan pengompakan 2,93 – 5,27  $\text{ton/cm}^2$  dapat memberikan perubahan kualitas pelet mentah, terutama densitas yang mengalami kenaikan menjadi 51,24 – 55,60% TD. Kenaikan densitas pelet mentah ini disebabkan adanya peningkatan tekanan pengompakan sehingga pelet yang terbentuk semakin padat, dimana ikatan antar butir menjadi kompak. Dalam spesifikasi produk yang dianjurkan tekanan pengompakan antara 52 – 56% TD. Melihat spesifikasi densitas pelet mentah tersebut, dapat diasumsikan bahwa tekanan pengompakan yang direkomendasikan adalah antara 3,51 – 5,27  $\text{ton/cm}^2$ .

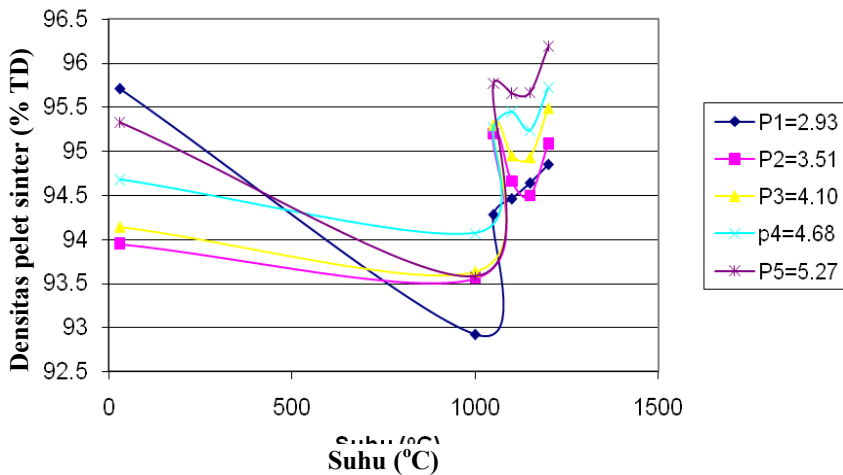


Gambar 1. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah.

### 3.2. Optimasi Suhu Sinter yang Mempengaruhi Densitas Pelet Sinter pada Berbagai Tekanan Pengompakan (P)

Suhu sinter dapat mempengaruhi besarnya densitas pelet sinter pada berbagai variasi tekanan pengompakan pelet mentah. Gambaran besarnya densitas pelet sinter pada berbagai tekanan pengompakan pelet mentah sebagai akibat kenaikan suhu 1000 – 1200 °C dapat dilihat pada Gambar 2. Tampak densitas pelet sinter naik sejalan dengan kenaikan suhu sinter pada berbagai tekanan pengompakan. Pada tekanan pengompakan yang lebih tinggi pada suhu sinter yang sama, densitas pelet sinter akan lebih tinggi jika dibandingkan dengan tekanan pengompakan pelet mentah yang lebih rendah. Hal ini juga berlaku untuk pelet pra-sinter. Ini disebabkan tekanan pengompakan yang lebih tinggi memberikan kepadatan yang lebih tinggi, sedangkan dengan kenaikan suhu sinter, pelet menjadi lebih padat.

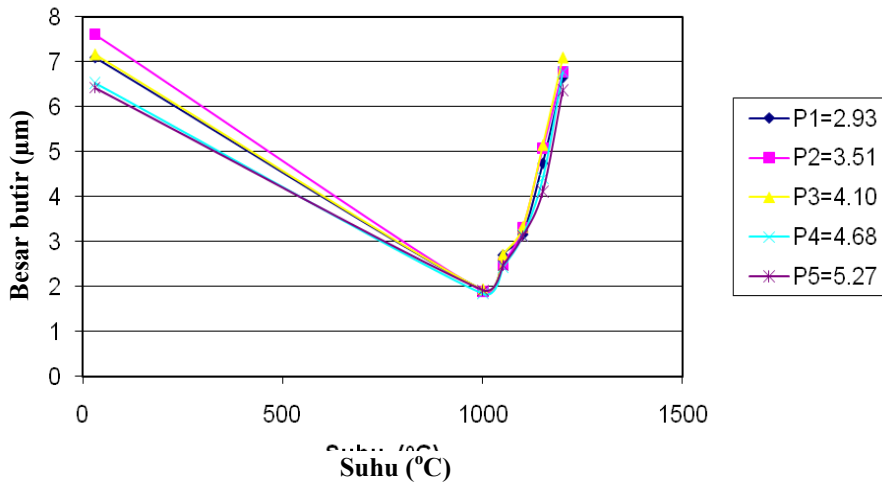
Dari spesifikasi pelet sinter yang ditetapkan, densitas pelet sinter adalah sebesar 95% TD. Dari data yang diperoleh, densitas 95% TD dapat dicapai pada suhu sinter sebesar 1050 – 1200 °C pada tekanan pengompakan pelet mentah antara 4,10 – 4,68 ton/cm<sup>2</sup> yang dapat memberikan densitas pelet sinter sekitar 95% TD.



Gambar 2. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet sinter pada berbagai suhu sinter.

### 3.3. Optimasi Suhu Sinter yang Mempengaruhi Besar Butir pada Berbagai Tekanan Pengompakan (P)

Suhu sinter dapat mempengaruhi besarnya diameter butir pada berbagai tekanan pengompakan 2,93 – 5,27  $ton/cm^2$ , yang dapat dilihat pada Gambar 3. Tampak bahwa kenaikan suhu sinter dari 1000 – 1200 °C dapat menaikkan besarnya diameter butir dari 2,00 – 7,00  $\mu m$  pada tekanan pengompakan 2,93 – 5,27  $ton/cm^2$ . Dari spesifikasi besar butir pelet sinter yang ditetapkan, besar butir pelet sinter adalah 6,00 – 8,00  $\mu m$ . Dari data yang ada, besar butir 6,00 – 8,00  $\mu m$  dapat dicapai pada suhu sinter 1200 °C dengan tekanan pengompakan pelet mentah antara 2,31 – 5,27  $ton/cm^2$ . Besar butir yang diperoleh sekitar 6,00 – 7,00  $\mu m$  atau besar butir pelet sinter tertinggi dicapai pada suhu sinter 1200 °C pada tekanan pengompakan 4,10  $ton/cm^2$  adalah 7,09  $\mu m$ .



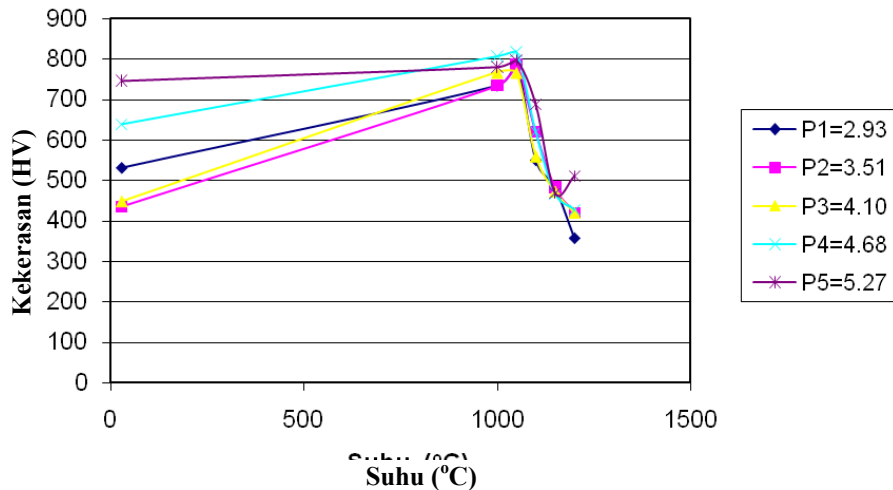
Gambar 3. Pengaruh suhu sinter terhadap besar butir pada berbagai tekanan pengompakan.

### 3.4. Optimasi Suhu Sinter yang Mempengaruhi Kekerasan pada Berbagai Tekanan Pengompakan (P)

Suhu sinter dari 1000 – 1200 °C dapat mempengaruhi besarnya kekerasan pelet sinter pada berbagai tekanan pengompakan 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup>. Data pengaruh suhu sinter terhadap kekerasan dapat ditunjukkan pada Gambar 4. Terlihat kenaikan suhu sinter menurunkan kekerasan pelet sinter yaitu mulai dari 800 – 400 HV. Tekanan terendah diperoleh pada suhu 1200 °C, sedangkan kekerasan tertinggi diperoleh pada suhu ~1000 °C pada tekanan pengompakan antara 4,68 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup>. Penurunan kekerasan diakibatkan bertambah besarnya diameter butir sehingga jumlah batas butir menjadi lebih rendah. Dengan demikian, gerakan dislokasi semakin mudah dan kekerasan pelet menjadi berkurang.

Dari spesifikasi teknis pelet sinter, tidak ditetapkan besarnya kekerasan. Di sini hanya disebutkan bahwa pelet harus cukup keras untuk menghindari kerusakan akibat pengangkutan, benturan, dan lainnya.



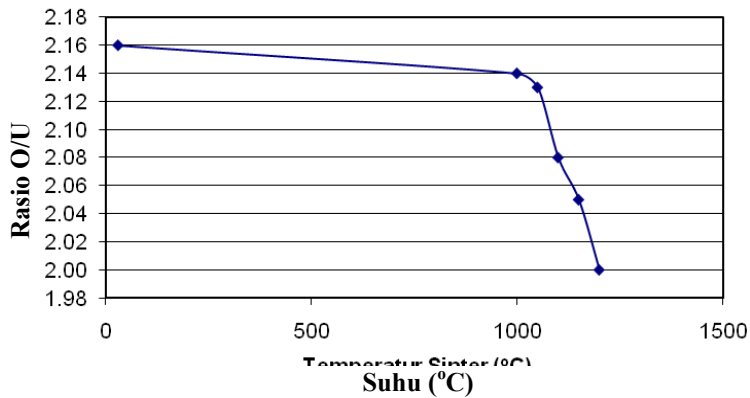


Gambar 4. Pengaruh suhu sinter terhadap kekerasan pelet (HV) pada berbagai tekanan pengompakan.

### 3.5. Optimasi Suhu Sinter yang Mempengaruhi Rasio O/U pada Berbagai Tekanan Pengompakan (P)

Suhu sinter dari 1000 – 1200 °C dapat mempengaruhi besarnya rasio O/U pelet sinter pada berbagai tekanan pengompakan 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup>. Data pengaruh suhu sinter terhadap rasio O/U dapat ditunjukkan pada Gambar 5. Terlihat kenaikan suhu sinter menurunkan rasio O/U pelet sinter yaitu mulai dari 2,14 – 2,00. Rasio O/U terendah yaitu 2,00 tercapai pada suhu 1200 °C. Sedangkan rasio O/U yang dipersyaratkan adalah 2,00 ± 0,015. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa suhu sinter yang optimum agar memenuhi rasio O/U seperti yang dipersyaratkan adalah 1200 °C.

Kenaikan suhu sinter dapat menurunkan rasio O/U. Hal ini terjadi karena adanya pelepasan oksigen dari  $U_4O_9$  akibat panas. Pelet yang menerima perlakuan pra-sinter pada suhu 300 °C selama 1 jam kemudian disinter pada suhu 1200 °C mempunyai rasio O/U lebih tinggi dari pelet tanpa pra-sinter kemudian disinter pada suhu 1200 °C. Hal ini dikarenakan pada saat pra-sinter terdapat kemungkinan terbentuknya  $U_3O_8$  sehingga rasio O/U tetap tinggi yakni 2,16.



Gambar 5. Grafik pengaruh suhu sinter terhadap rasio O/U.

### 3.6. Optimasi Tekanan Pengompakan dan Suhu Sinter dalam Proses Pengompakan dan Sintering.

Dari Gambar 1, 2, 3, 4 dan 5 terlihat bahwa:

1. Tekanan pengompakan yang memenuhi persyaratan agar densitas pelet mentah 5,20 – 5,60% TD adalah pada tekanan pengompakan 3,50 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup>.
2. Optimasi suhu sinter pada berbagai tekanan pengompakan pelet mentah 2,93 – 5,27 ton/cm<sup>2</sup> untuk menghasilkan densitas pelet sinter 95% TD adalah pada suhu sinter 1050 – 1200 °C dan tekanan pengompakan pelet mentah 4,10 – 4,68 ton/cm<sup>2</sup>.
3. Optimasi suhu sinter pada berbagai tekanan pengompakan pelet mentah untuk menghasilkan besar butir antara 6,00 – 8,00 µm terjadi pada suhu sinter 1200 °C dan tekanan pengompakan pelet mentah 4,68 ton/cm<sup>2</sup>.
4. Optimasi suhu sinter pada berbagai tekanan pengompakan untuk mendapatkan kekerasan yang memenuhi persyaratan adalah pada suhu sinter 1000 – 1200 °C dengan kekerasan antara 800 – 400 HV.
5. Optimasi suhu sinter pada tekanan pengompakan 4,68 ton/cm<sup>2</sup> agar memenuhi rasio sebesar 2,00 ± 0,015 adalah pada suhu 1200 °C.

Dari poin 1, 2, 3, 4 dan 5 di atas, jika pada masing-masing grafik dibuat garis berskala kemudian dijumlahkan untuk memberikan pelet sinter yang memenuhi persyaratan, diperoleh parameter suhu 1200 °C dan tekanan 4,10 atau 4,68 ton/cm<sup>2</sup>.

#### IV. KESIMPULAN

Dari hasil penelitian, setelah dilakukan analisis data terhadap pelet sinter  $UO_2$  serbuk halus 38 – 75  $\mu m$  yang dikompaksi antara 2,93 – 5,27  $ton/cm^2$  dan disinter pada suhu 1000 – 1200  $^{\circ}C$  dalam suasana gas argon, laju pemanasan sintering 250  $^{\circ}C/jam$  dan waktu sinter 3 jam, maka dapat disimpulkan bahwa parameter proses yang memenuhi spesifikasi teknis pelet  $UO_2$  sinter adalah:

1. Tekanan pengompakan 4,10 atau 4,68  $ton/cm^2$ .
2. Suhu sinter 1200  $^{\circ}C$  pada laju pemanasan 250  $^{\circ}C/jam$  dalam lingkungan gas argon dan waktu sinter 3 jam.

#### V. DAFTAR PUSTAKA

1. Abdel, M.S. & AZIM. (1994). Contribution of Fuel Element Fabrication of  $UO_2$  Pelet using Lower Sintering Temperature. *Journal of Nuclear Material*, Kairo.
2. Benyamin, M. MA. (1983). *Nuclear Reactor Material and Applications*. Van Nostrand Reinhold, New York.
3. Fizzoti, C. (1984). *Principles of Nuclear Production*. ENEA/BATAN, Jakarta.
4. Gustaman, D.S., & Gandana. (1987). Pengaruh Ukuran Serbuk  $UO_2$  terhadap Karakteristik Fisis Serbuk dan Pelet. *Prosiding Seminar Teknologi Daur Bahan Bakar dan Keselamatan Nuklir*, Bandung.
5. Rachmawati, M. (1997). Karakteristik Serbuk  $UO_2$  (CAMECO) untuk Fabrikasi Pelet  $UO_2$  Tipe CANDU. *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar dan Keselamatan Nuklir*, BATAN, Jakarta.
6. Wijaksana, & Mutiara, E. (1997). Pengaruh Komposisi Serbuk Halus  $UO_2$  terhadap Kerapatan Kompakan Serbuk Pelet  $UO_2$ . *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar dan Keselamatan Nuklir*, BATAN, Jakarta.

## LAMPIRAN

Tabel 1. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah

No	Densitas pelet mentah (% TD) pada berbagai tekanan P (ton/cm <sup>2</sup> )				
	P1 = 2,93	P2 = 3,51	P3 = 4,10	P4 = 4,68	P5 = 5,27
1.	51,25	52,27	53,00	54,27	55,18
2.	51,18	52,10	53,12	53,69	55,07
3.	51,03	52,02	53,04	53,74	55,50
4.	51,40	52,02	53,97	54,23	55,64
5.	51,17	51,99	53,17	53,88	55,57
6.	51,44	51,81	53,21	54,07	55,60
Rata-rata	51,24	52,04	53,09	53,97	55,43

Tabel 2. Pengaruh suhu sinter terhadap densitas pelet sinter pada berbagai tekanan pengompakan (P)

Suhu (°C)	Densitas pelet sinter (%TD), pada tekanan P (ton/cm <sup>2</sup> )				
	P1 = 2,93	P2 = 3,51	P3 = 4,10	P4 = 4,68	P5 = 5,27
1000	92,92	93,56	93,63	94,07	93,58
1050	94,28	95,20	95,30	95,27	95,77
1100	94,46	94,66	94,95	95,45	95,66
1150	94,64	94,85	94,93	95,24	95,67
1200	94,85	95,09	95,49	95,72	96,19
Pra-sinter	95,71	93,95	94,14	94,68	95,33

Tabel 3. Pengaruh suhu sinter terhadap besar butir pada berbagai tekanan pengompakan (P)

Suhu (°C)	Besar butir (µm) pada berbagai tekanan P (ton/cm <sup>2</sup> )				
	P1 = 2,93	P2 = 3,51	P3 = 4,10	P4 = 4,68	P5 = 5,27
1000	1,92	1,89	1,93	1,84	1,92
1050	2,70	2,50	2,70	2,43	2,47
1100	3,16	3,30	3,32	3,13	3,12
1150	4,74	5,07	5,14	4,41	4,11
1200	6,65	6,77	7,09	6,77	6,37
Pra-sinter	7,09	7,60	7,16	6,53	6,42

Tabel 4. Pengaruh suhu sinter terhadap kekerasan pelet (HV) pada berbagai tekanan pengompakan (P)

Suhu (°C)	Kekerasan pelet (HV) pada berbagai tekanan P (ton/cm <sup>2</sup> )				
	P1=2,93	P2=3,51	P3=4,10	P4=4,68	P5=5,27
1000	733,70	733,7	766,3	806,5	779,6
1050	788,5	785,0	766,3	817,4	795,9
1100	549,9	618,6	559,8	620,1	687,5
1150	482,0	482,0	473,1	466,7	468,7
1200	357,8	419,3	420,8	427,3	509,9
Pra-sinter	531,1	434,6	449,0	638,6	745,3

Tabel 5. Pengaruh suhu sinter terhadap rasio O/U

Suhu sinter (°C)	Pra-sinter	1000	1050	1100	1150	1200
Rasio O/U	2,16	2,14	2,13	2,08	2,05	2,00