

PENGARUH TEKANAN PENGOMPAKAN, KOMPOSISI Er_2O_3 DAN PENYINTERAN PADA TEMPERATUR RENDAH TERHADAP KUALITAS PELET $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$

Abdul Latief, Tata Terbit S., Djoko Kisworo, Slamet Pribadi, Arief S.A.
Pusbangtek Bahan Bakar Nuklir dan Daur Ulang – BATAN, Serpong

ABSTRAK

PENGARUH TEKANAN PENGOMPAKAN, KOMPOSISI Er_2O_3 DAN PENYINTERAN PADA TEMPERATUR RENDAH TERHADAP KUALITAS PELET $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$. Telah dilakukan percobaan pengaruh tekanan pengompakan, komposisi Er_2O_3 dan sintering pada temperatur rendah terhadap densitas, mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U dari pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ dengan tujuan untuk mengetahui tekanan pengompakan, komposisi Er_2O_3 dan temperatur sinter yang relatif baik agar dapat memberikan kualitas pelet yang memenuhi persyaratan. Sejumlah serbuk $\text{UO}_2 < 150 \mu\text{m}$ dicampur dengan Er_2O_3 yang divariasikan dari 0 – 1% dan seng stearat 0,4% kemudian dikompakkan dengan tekanan antara 2,93 – 5,23 ton/cm². Pelet yang terbentuk disinter pada temperatur 1000, 1100 dan 1200 °C, dengan laju pemanasan 250 °C/jam, waktu penahanan 3 jam dalam lingkungan gas argon. Pelet hasil sinter ditentukan densitasnya, diamati mikrostrukturnya dengan mikroskop optik dan diuji kekerasannya dengan alat uji kekerasan Vickers serta dihitung rasio O/U-nya dengan metode gravimetri. Hasil percobaan menunjukkan bahwa tekanan pengompakan antara 2,93 – 4,68 ton/cm² terhadap pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ dengan komposisi Er_2O_3 0 – 1,0% dapat meningkatkan densitas pelet mentah dari kisaran 45,45 – 51,68% DT (Densitas Teoritis), sedangkan naiknya temperatur sinter antara 1000 – 1200 °C dapat meningkatkan densitas pelet sinter sampai 95,66% DT. Densitas pelet sinter yang memenuhi spesifikasi (92 – 95% DT) diperoleh pada temperatur sinter 1200 °C, tekanan pengompakan 4,10 – 4,68 ton/cm² untuk komposisi Er_2O_3 antara 0 – 1,0%. Pada temperatur sinter 1000 °C dan 1100 °C hanya diperoleh densitas pelet sinter dibawah 92% DT. Pengamatan mikrostruktur dilakukan terhadap sampel $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ dengan komposisi Er_2O_3 0 – 1,0% yang dikompakkan pada tekanan 4,68 ton/cm² dan temperatur sinter 1200 °C mempunyai butir bentuk ekuiaksial (*equiaxial*). Perubahan komposisi Er_2O_3 memberikan perbedaan ukuran butir dan kekerasan. Semakin besar komposisi Er_2O_3 maka butir pelet sinter akan semakin besar yaitu sebesar 8 μm dan kekerasan akan semakin turun. Kenaikan komposisi Er_2O_3 pada penyinteran temperatur 1200 °C menyebabkan kenaikan rasio O/U sampai 2,12.

KATA KUNCI: Racun dapat bakar, Komposisi Er_2O_3 , Pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$, Pengompakan, Sintering temperatur rendah, Densitas, Mikrostruktur, Kekerasan, Rasio O/U

ABSTRACT

INFLUENCE OF COMPACTING PRESSURE, Er_2O_3 COMPOSITION AND LOW-TEMPERATURE SINTERING ON $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ PELLET QUALITY. The influence of compacting pressure, Er_2O_3 composition and low-temperature sintering on the density, microstructure, hardness and O/U ratio of $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ pellets was investigated to determine the optimum condition of compacting pressure, Er_2O_3 composition and sintering temperature to obtain good quality pellets. UO_2 powder of $< 150 \mu\text{m}$ in size was mixed with Er_2O_3 of 1 - 1.0% and zinc stearat of 0.4% and then compacted at pressures of 2.9 – 5.23 ton/cm². The green pellets were sintered at temperatures of 1000, 1100 and

1200 °C with a heating rate of 250 °C/hour and soaking time of 3 hours in argon atmosphere. The density of the pellets was determined, also the microstructure using optical microscope, hardness using Vickers hardness tester and O/U ratio using gravimetric method. The results showed that compacting pressure of 2.93 – 4.68 ton/cm² on $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ pellets with Er_2O_3 composition of 0 – 1.0% could enhance green pellet density in the order of 45.45 – 51.68% TD (Theoretical Density), while increasing sintering temperature between 1000 – 1200 °C enhanced sintered pellet density to 95.66% TD. Sintered pellet density of 92 – 95% TD which conform to the specification was obtained at sintering temperature of 1200 °C, compacting pressure of 4.10 – 4.68 ton/cm², and Er_2O_3 composition of 0 – 1.0%. At temperature of 1000 and 1100 °C the density of the pellets obtained was <92% TD. The microstructure observation which was done on $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ samples with Er_2O_3 composition of 0 – 1.0%, compacting pressure of 4.68 ton/cm² and sintering temperature of 1200 °C showed the presence of equiaxial grains. Changes in Er_2O_3 composition resulted in different grain sizes and hardness. Higher Er_2O_3 composition increased the size of sintered pellet grain to 8 μm and decreased its hardness. Increasing Er_2O_3 composition at sintering temperature of 1200 °C enhanced the O/U ratio up to 2.12.

FREE TERMS: Burnable poison, Er_2O_3 composition, $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ pellet, Compacting pressure, Low-temperature sintering, Density, Microstructure, Hardness, O/U ratio

I. PENDAHULUAN

Dalam rangka mendukung Landmark BATAN bidang energi, maka pengembangan teknologi bahan bakar reaktor daya terus ditingkatkan dengan penambahan racun dapat bakar (*burnable poison*) pada bahan bakar uranium dioksida dan proses sinter yang dilaksanakan pada temperatur rendah maksimum 1200 °C. Biasanya temperatur sinter dilakukan pada temperatur 1700 °C untuk memperoleh pelet sinter yang memenuhi standar kualitas.

Bahan bakar utama reaktor daya baik untuk jenis LWR maupun PHWR adalah uranium dioksida. Di dalam reaktor, bahan bakar tersebut mengalami proses iradiasi, sehingga dapat menimbulkan terjadinya perubahan reaktivitas teras yang disebabkan oleh adanya pengurangan bahan bakar dan terbentuknya racun Xe. Untuk mengurangi perubahan reaktivitas tersebut, salah satu cara yang digunakan adalah dengan menambahkan beberapa bahan yang berfungsi sebagai racun dapat bakar (*burnable poison*) seperti yang dilakukan pada reaktor jenis LWR. Beberapa jenis racun dapat bakar adalah Gd_2O_3 (Gd 155/157), Er_2O_3 , ^{10}B , Y_2O_3 , Se_2O_3 dan Nd_2O_3 ^[1].

Penambahan bahan racun dapat bakar dimaksudkan untuk mengatur daya reaktor dan mengkompensasi kelebihan reaktivitas^[2]. Disamping itu racun dapat bakar mudah ditempatkan di semua rakitan/pelet bahan bakar, mudah terbakar pada saat diiradiasi, tidak menimbulkan perubahan unjuk kerja bahan bakar dan membatasi akumulasi *burnup* sehingga umur bahan bakar menjadi lebih lama^[3].

Dari beberapa jenis racun dapat bakar tersebut, dipilih Er_2O_3 karena kelarutan Er dalam U adalah dibawah 1,2%, dan mudah terbentuk apabila atom terlarut memiliki ukuran dan struktur elektron yang serupa. Masuknya Er dalam atom U dimungkinkan dapat mempengaruhi densitas, mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U yang tergantung pada homogenitas fasa oksida antara UO_2 dan Er_2O_3 . Disamping itu kualitas pelet sinter yang dihasilkan sangat tergantung pada banyaknya Er_2O_3 yang ditambahkan, temperatur sinter dan waktu sinter. Namun demikian, jumlah Er_2O_3 yang ditambahkan ke dalam UO_2 dibatasi oleh kelarutan Er_2O_3 dalam UO_2 . Jika Er_2O_3 yang ditambahkan melebihi besarnya kelarutan Er_2O_3 dalam UO_2 ,

maka akan menyebabkan terbentuknya fasa ke-2. Apabila Er_2O_3 yang ditambahkan semakin besar sampai batas kelarutan dapat mempengaruhi sifat $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ terutama densitas, mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U.

Dalam penelitian ini dipelajari pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$, pengaruh komposisi atau banyaknya racun dapat bakar Er_2O_3 yang ditambahkan ke bahan bakar uranium dioksida, dan pengaruh penyinteran pada temperatur rendah terhadap kualitas pelet sinter yaitu densitas, mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U dengan hipotesis bahwa tekanan pengompakan, penambahan racun dapat bakar tersebut dan penyinteran pada temperatur rendah akan mempengaruhi kualitas pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$.

II. TATA KERJA

2.1. Bahan

Bahan utama yang digunakan adalah UO_2 yang diperoleh dari Comeco (Perancis) dengan diameter butir $<150 \mu\text{m}$. Bahan racun dapat bakar yang dipakai yaitu Er_2O_3 berasal dari Aldrich dengan kemurnian 99,8%, berbentuk serbuk dan berdiameter butir halus.

2.2. Alat

Alat utama untuk penyinteran adalah tungku horisontal Nabertherm, temperatur operasi maksimum 1350°C . Untuk pengompakan digunakan alat kompaksi (*press*), sedangkan untuk pencampuran digunakan alat tangki pencampur. Alat lain yang digunakan adalah timbangan analitik, alat ukur dimensi, mikroskop optik dan *muffle furnace*.

2.3. Cara Kerja

Sejumlah tertentu serbuk UO_2 dicampur dengan seng stearat sebanyak 0,4% lalu dimasukkan ke dalam tangki pencampur dan diputar selama 3×30 menit dengan putaran 50 rpm. Ke dalam campuran tersebut ditambahkan bahan racun dapat bakar yaitu Er_2O_3 yang divariasi sebesar 0%; 0,2%; 0,4%; 0,6%; 0,8% dan 1,0% dan diputar kembali 3×30 menit dengan kecepatan 50 rpm. Hasil pencampuran yang diperoleh tidak menggumpal dan kemudian dikompakkan pada tekanan 2,93; 3,51; 4,10; 4,68 dan 5,23 ton/cm^2 . Pelet mentah yang terbentuk (kecuali 5,23 ton/cm^2 karena cacat) diukur berat, volume dan densitasnya. Setelah itu pelet mentah tersebut disinter pada temperatur 1000, 1100 dan 1200°C dengan laju pemanasan 250°C/jam dan waktu penahanan 3 jam dalam lingkungan gas argon. Terhadap pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang diperoleh diukur densitas, kekerasan, mikrostruktur dan rasio O/U secara gravimetri.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

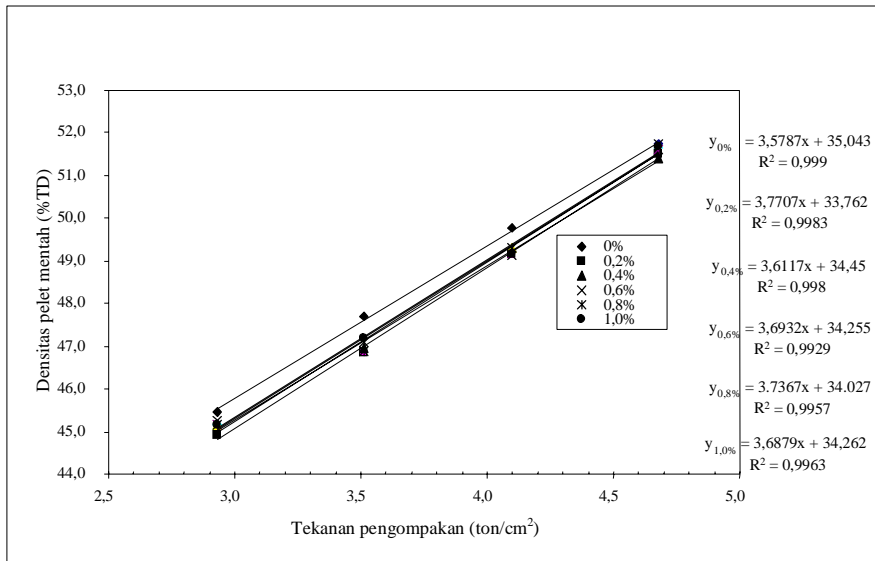
3.1. Pengaruh Tekanan Pengompakan terhadap Densitas Pelet Mentah $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$

Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang bervariasi dari 0 – 1,0% dapat diamati pada Tabel 1 dan Gambar 1.

Tabel 1. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah UO₂ + Er₂O₃

No.	Tekanan pengompakan (ton/cm ²)	Densitas pelet mentah UO ₂ + Er ₂ O ₃ (% DT)					
		0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1,0%
1.	2,93	45,45	44,92	45,14	45,25	45,15	45,15
2.	3,51	47,70	46,86	46,95	47,09	46,90	47,20
3.	4,10	49,76	49,17	49,29	49,13	49,31	49,15
4.	4,68	51,73	51,49	51,39	51,76	51,62	51,68
5.	5,23	-	-	-	-	-	-

- : tidak ada data karena pelet patah



Gambar 1. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet mentah UO₂ + Er₂O₃

Dari Tabel 1 dan Gambar 1 dapat dilihat bahwa kenaikan tekanan pengompakan sampai 4,68 ton/cm² dapat meningkatkan densitas pelet mentah UO₂ + Er₂O₃ pada berbagai komposisi Er₂O₃ (0,2%; 0,4%; 0,6%; 0,8%; 1,0%). Peningkatan densitas pelet mentah UO₂ + Er₂O₃ dari tekanan pengompakan 2,93 – 4,68 ton/cm² adalah antara 45,0 – 51,68% DT (Densitas Teoritis). Densitas terbesar diperoleh pada tekanan 4,68 ton/cm². Dilihat dari perubahan densitas antara UO₂ tanpa Er₂O₃ dengan UO₂ + Er₂O₃, maka tidak ada perbedaan yang besar untuk tekanan pengompakan antara 2,93 – 4,68 ton/cm². Naiknya tekanan menyebabkan densitas pelet mentah naik, tetapi apabila tekanan pengompakan dinaikkan menjadi 5,23 ton/cm², pelet mentah patah di bagian tengah (sampel no.5), sedangkan kenaikan densitas disebabkan oleh daya ikat partikel UO₂ – UO₂, UO₂ – Er₂O₃ atau Er₂O₃ – Er₂O₃ yang masih mampu berikatan sampai tekanan pengompakan 4,68 ton/ cm².

3.2. Pengaruh Tekanan Pengompakan dan Komposisi Er_2O_3 terhadap Densitas Pelet Sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$

Pengaruh tekanan pengompakan dan komposisi Er_2O_3 terhadap densitas pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ hasil proses sinter pada temperatur 1000, 1100 dan 1200 °C dengan laju pemanasan 250 °C/jam dan waktu sinter 3 jam dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 2.

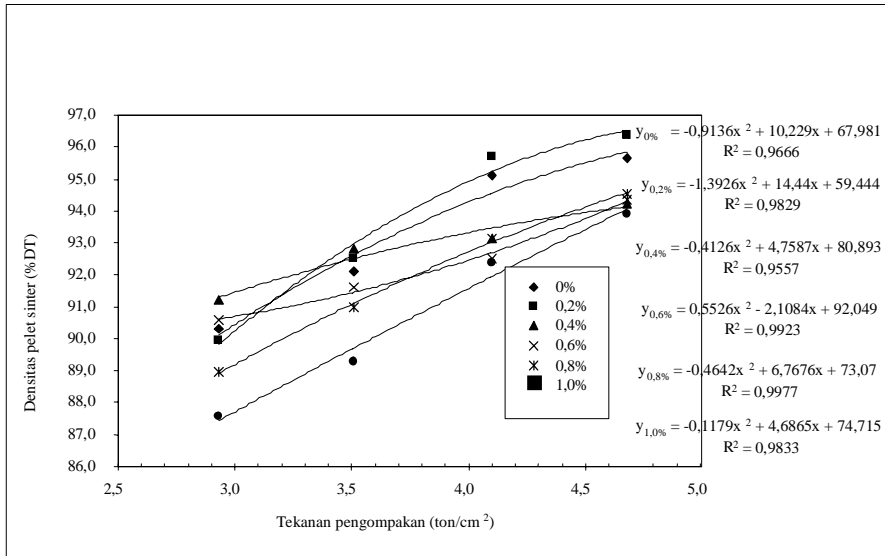
Dari Tabel 2 terlihat bahwa pada temperatur sinter 1000 °C dan 1100 °C belum terlihat adanya kenaikan densitas yang memenuhi persyaratan yaitu 92 – 95% DT. Densitas tertinggi hanya mencapai maksimum 85,31% DT, sehingga pada temperatur tersebut belum mampu meningkatkan densitas hingga mencapai 92% DT. Tetapi jika temperatur sinter dinaikkan menjadi 1200 °C, maka tampak bahwa naiknya tekanan pengompakan dapat meningkatkan densitas mendekati spesifikasi 92 – 95% DT, terutama untuk tekanan pengompakan 4,10 ton/cm² dan 4,68 ton/cm². Disamping itu ada kecenderungan bahwa naiknya komposisi Er_2O_3 dapat menurunkan densitas pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$, sehingga penambahan Er_2O_3 merupakan penghambat naiknya densitas.

Tabel 2. Densitas pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang diperoleh pada berbagai tekanan pengompakan, komposisi Er_2O_3 dan temperatur sinter

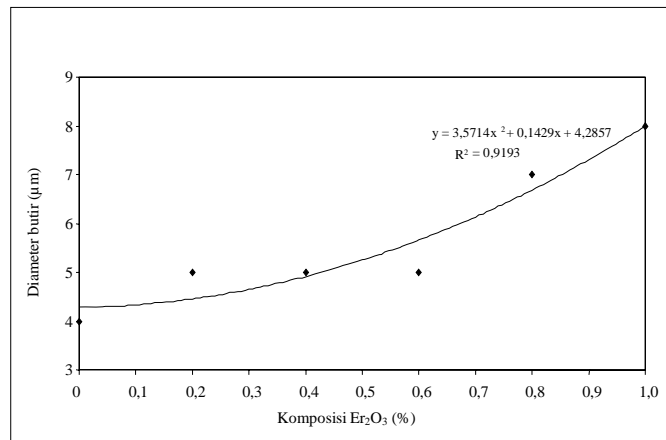
No.	Tekanan (ton/cm ²)	Densitas pelet mentah $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ bervariasi (% DT)					
		0%	0,2%	0,4%	0,6%	0,8%	1,0%
Temperatur sinter 1000 °C							
1.	2,93	51,31	49,95	-	50,71	53,40	54,39
2.	3,51	54,57	53,45	54,03	54,06	54,27	55,89
3.	4,10	54,21	51,32	51,66	52,17	53,71	48,00
4.	4,68	-	-	-	51,55	51,29	53,29
Temperatur sinter 1100 °C							
5.	2,93	64,55	63,88	77,62	71,58	66,95	69,45
6.	3,51	81,38	83,87	72,52	81,48	78,32	81,50
7.	4,10	81,94	84,04	84,45	85,08	86,09	85,77
8.	4,68	85,30	75,35	83,54	80,23	85,31	82,07
Temperatur sinter 1200 °C							
9.	2,93	90,29	89,95	91,19	90,56	88,96	87,58
10.	3,51	92,09	92,52	92,82	91,62	90,97	89,28
11.	4,10	95,10	95,69	93,16	92,53	93,15	92,38
12.	4,68	95,66	96,37	94,34	94,34	94,53	93,92

- : tidak ada data karena pelet patah

Apabila temperatur sinter dinaikkan menjadi 1200 °C, maka telah terjadi perubahan densitas $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang dapat pula disimak pada Gambar 2 dimana terlihat bahwa variasi tekanan pengompakan pada berbagai komposisi Er_2O_3 (0 – 1,0%) dapat meningkatkan densitas pelet sinter. Pada tekanan pengompakan 4,10 ton/cm² dan 4,68 ton/cm² pada berbagai komposisi Er_2O_3 , densitas pelet sinter yang diperoleh telah memenuhi spesifikasi 92,5 – 96,0% DT.



Gambar 2. Pengaruh tekanan pengompakan terhadap densitas pelet sinter UO₂ + Er₂O₃ pada berbagai komposisi Er₂O₃, temperatur sinter 1200 °C

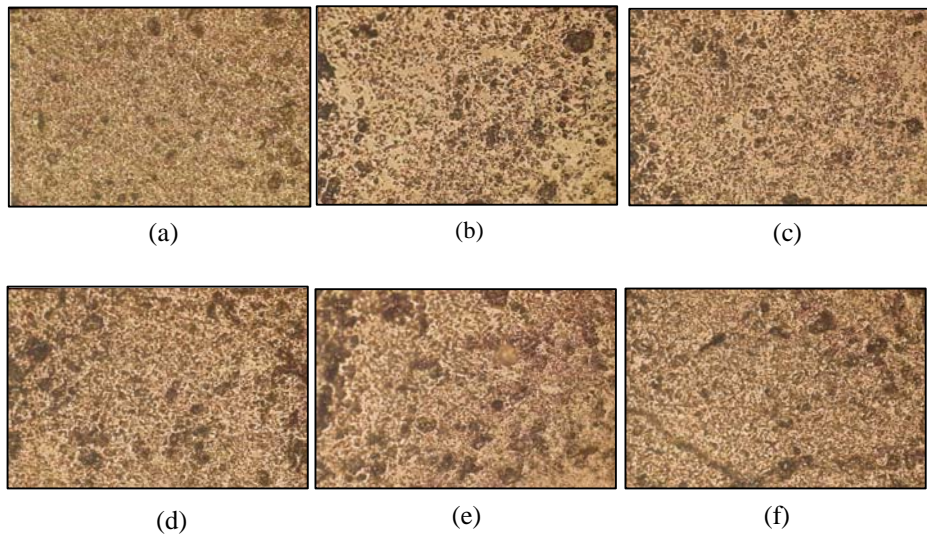


Gambar 3. Pengaruh komposisi Er₂O₃ terhadap diameter butir pelet sinter UO₂ + Er₂O

3.3. Pengaruh Komposisi Er₂O₃ terhadap Diameter Butir Pelet Sinter UO₂ + Er₂O₃

Pada Gambar 3 disajikan pengaruh komposisi Er₂O₃ terhadap diameter butir pelet sinter UO₂ + Er₂O₃ yang diperoleh pada kondisi operasi tekanan pengompakan 4,68 ton/cm² dan temperatur sinter 1200 °C. Tampak bahwa ada kecenderungan pembesaran butir sejalan dengan naiknya komposisi Er₂O₃ (maksimum 1,0%). Perubahan komposisi Er₂O₃ sampai 0,6% memberikan perubahan butir pelet sinter yang relatif stabil, kemudian penambahan Er₂O₃

antara 0,6 – 1,0% memberikan perubahan diameter butir yang relatif besar, yaitu sampai 8 μm . Perbesaran/pertumbuhan butir disebabkan oleh adanya pergerakan batas butir. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan energi bebas. Di samping itu, penambahan Er_2O_3 dapat menyebabkan bertambah banyaknya inti butir, yang dapat menyebabkan penggabungan inti menjadi lebih besar. Pada Gambar 4 dapat dilihat mikrostruktur $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ dengan komposisi Er_2O_3 mulai dari 0 – 1,0%.



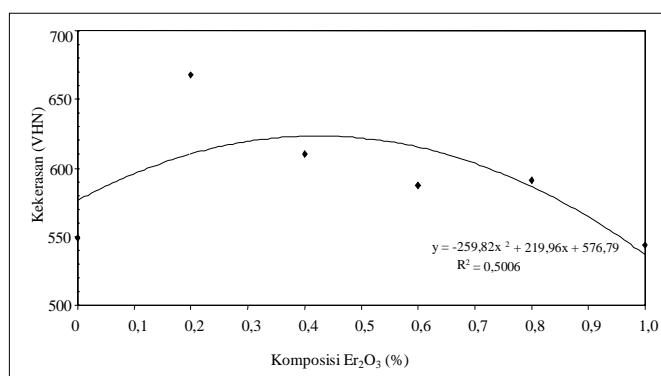
Gambar 4. Mikrostruktur $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang disinter pada temperatur 1200 $^{\circ}\text{C}$, laju pemanasan 250 $^{\circ}\text{C}/\text{jam}$, waktu 3 jam dan tekanan pengompakan 4,68 ton/cm^2 dengan komposisi Er_2O_3 : a = 0%, b = 0,2%, c = 0,4%, d = 0,6%, e = 0,8%, f = 1,0%

3.4. Pengaruh Komposisi Er_2O_3 (0 – 1)% terhadap Kekerasan Pelet Sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$

Pengaruh komposisi Er_2O_3 terhadap kekerasan pelet sinter dapat dilihat pada Tabel 3 dan Gambar 5. Sebagai pembandingan disajikan pula data diameter butir. Pada tabel dan gambar tersebut terlihat bahwa ada kecenderungan penurunan kekerasan sejalan dengan naiknya komposisi Er_2O_3 . Perubahan komposisi Er_2O_3 dari 0,2 – 0,3% memberikan perubahan kekerasan yang relatif besar jika dibandingkan dengan kekerasan pelet tanpa Er_2O_3 . Kemudian penambahan Er_2O_3 antara 0,6 – 1,0% memberikan perubahan kekerasan yang relatif kecil. Perubahan kekerasan tersebut ternyata sejalan dengan perubahan diameter butir pelet, yaitu semakin besar komposisi Er_2O_3 maka kekerasan akan turun dan diameter butir pelet semakin besar. Hal ini disebabkan makin besarnya butir pelet menjadikan batas butir semakin kecil sehingga mempermudah gerakan dislokasi dan kekerasan semakin turun. Disamping itu banyaknya Er_2O_3 dapat meningkatkan oksigen terjebak dan memperlambat panas difusi sehingga densifikasi menurun.

Tabel 3. Pengaruh komposisi Er_2O_3 terhadap diameter butir dan kekerasan pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ pada temperatur sinter $1200\text{ }^\circ\text{C}$ dan tekanan pengompakan $4,68\text{ ton/cm}^2$

No.	Komposisi Er_2O_3 (%)	Diameter butir (μm)	Kekerasan (VHN)
1.	0	4	549
2.	0,2	5	668
3.	0,4	5	610
4.	0,6	5	587
5.	0,8	7	591
6.	1,0	8	544

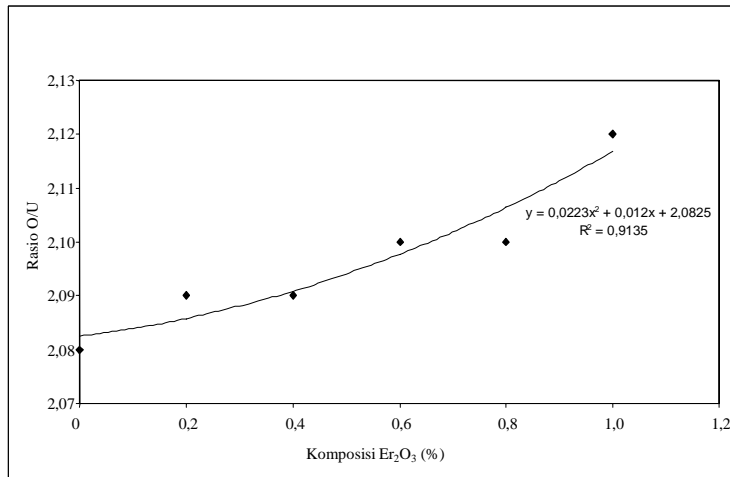
Gambar 5. Pengaruh komposisi Er_2O_3 terhadap kekerasan pelet sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}$ (temperatur sinter $1200\text{ }^\circ\text{C}$)

3.5. Pengaruh Komposisi Er_2O_3 terhadap Rasio O/U Pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$

Selain temperatur sinter, komposisi Er_2O_3 dalam pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ juga mempengaruhi kualitas pelet. Pada Tabel 4 dan Gambar 6 ditampilkan pengaruh komposisi Er_2O_3 terhadap rasio O/U pada temperatur sinter $1200\text{ }^\circ\text{C}$, laju pemanasan $250\text{ }^\circ\text{C/jam}$ dan waktu 3 jam dengan pendinginan secara alami.

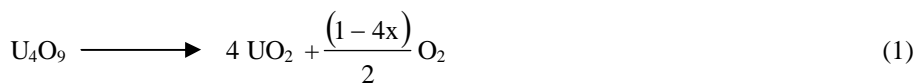
Tabel 4. Pengaruh komposisi Er_2O_3 rasio O/U pada temperatur sinter $1200\text{ }^\circ\text{C}$ dan tekanan pengompakan $4,10\text{ ton/cm}^2$

No.	Komposisi Er_2O_3 (%)	Rasio O/U pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$
1.	0	2,08
2.	0,2	2,09
3.	0,4	2,09
4.	0,6	2,10
5.	0,8	2,10
6.	1,0	2,12



Gambar 6. Pengaruh komposisi Er₂O₃ terhadap rasio O/U pada temperatur sinter 1 200 °C dan tekanan pengompakan 4,10 ton/cm²

Tampak bahwa semakin besar komposisi Er₂O₃ sampai 1,0%, semakin besar pula rasio O/U yang diperoleh yaitu sampai 2,12. Pada komposisi Er₂O₃ yang relatif kecil (0,2%) diperoleh rasio O/U 2,09. Sedangkan UO₂ tanpa Er₂O₃ mempunyai rasio O/U 2,08. Pada dasarnya, oksigen dalam Er₂O₃ dapat mempercepat proses sinter. Hal ini dikarenakan adanya difusi oksigen yang dapat mempercepat densifikasi. Pemadatan/densifikasi yang terjadi pada saat tertentu dapat menghambat difusi sehingga oksigen dalam pelet terjebak dan sulit keluar. Hal ini terlihat bahwa semakin besar Er₂O₃, rasio O/U semakin besar ; dengan kata lain banyak oksigen yang terjebak sehingga densifikasi semakin lambat. Pelepasan oksigen terjadi dapat terbentuk seperti melalui reaksi berikut.



Pada saat proses sinter berlangsung, terjadi perubahan kristal U₄O₉ (*rhombic*) menjadi UO₂ (FCC), sehingga lebih kompak dan volumenya mengecil.

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian pengaruh tekanan pengompakan, komposisi Er₂O₃ dan penyinteran pada temperatur rendah terhadap kualitas pelet UO₂ + Er₂O₃ yaitu densitas, mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U pelet sinter UO₂ + Er₂O₃, dapat disimpulkan bahwa :

1. Perubahan tekanan pengompakan dan temperatur sinter antara 1000 – 1200 °C dan komposisi terhadap UO₂ + Er₂O₃ dapat mempengaruhi densitas, perubahan mikrostruktur, kekerasan dan rasio O/U.
2. Tekanan pengompakan 2,93 – 4,68 ton/cm² menaikkan densitas pelet mentah UO₂ + Er₂O₃ dengan komposisi Er₂O₃ 0 – 1,0% sebesar 45,45 – 51,68% DT, sedangkan densitas pelet

sinter yang diperoleh pada kondisi tersebut dan penyinteran pada temperatur 1000 – 1200 °C sebesar 51,31 – 93,92% DT.

3. Tekanan pengompakan dan temperatur sinter $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ yang memberikan spesifikasi bahan bakar relatif baik adalah tekanan 4,10 dan 4,68 ton/cm^2 , dan temperatur sinter 1200 °C.
4. Pada tekanan pengompakan 4,68 ton/cm^2 , temperatur sinter 1200 °C memberikan butir pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ antara 4 – 8 μm dan kekerasan antara 544 – 668 VHN.
5. Tekanan pengompakan 4,10 ton/cm^2 , temperatur sinter 1200 °C terhadap pelet $\text{UO}_2 + \text{Er}_2\text{O}_3$ dan komposisi Er_2O_3 0 – 1,0% memberikan rasio O/U antara 2,08 – 2,12.

V. DAFTAR PUSTAKA

1. JONES, W.D., “Fundamental Principles of Powder Metallurgy”, Edward Arnold LTD, London.
2. WEBSTER, H., and NORMAN, B., “The Effects of Furnace Atmospheres on the Sintering Behaviour of Uranium Dioxide”, Mineral Dressing and Process Metallurgy Division, Canada.
3. BENJAMIN, M.A., “Nuclear Reactor Materials and Applications”, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1983, pp.53-377.
4. JAMES, F., et. al., “ UO_2 Powder Characteristics and Ceramic Performance”, Meeting on Characterization of UO_2 , United States Atomic Energy Commission, Tennessee, pp.147-166.