

PEMBUATAN LOGAM URANIUM DARI UF_4 DENGAN METODE PROSES REDUKSI KALSIO THERMIK

Agoeng Kadarjono dan Supardjo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBN)– BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong, Tangerang Selatan

Email : agung_batan@yahoo.com

ABSTAK

PEMBUATAN LOGAM URANIUM DARI UF_4 DENGAN METODE PROSES REDUKSI KALSIO THERMIK. Metode proses reduksi kalsiothermik dipilih dalam rangka pembuatan logam uranium untuk mendapatkan produk yang memenuhi spesifikasi bahan bakar nuklir. Percobaan yang dilakukan dengan mencampur serbuk UF_4 dan logam Ca *granular* murni (diameter butir -2 mm = 40 %, dan +2-6 mm = 60%), masing-masing sebanyak 6800 g dan 2180 g (ekses logam Ca 25% dari stoichiometrinya). Campuran UF_4 dan Ca dimasukkan kedalam tabung grafit, kemudian dipindahkan ke dalam tabung baja untuk dipanaskan di dalam tungku reduksi. Tungku reduksi dipanaskan dan ditahan pada temperatur $600^{\circ}C$ selama ± 15 menit, kemudian diturunkan menjadi $400^{\circ}C$ untuk dilakukan pemantikan. Hasil reduksi terdiri dua lapisan yaitu logam U berada di dasar cawan, sedangkan *slag* CaF_2 pada lapisan atas. Logam uranium memiliki kemurnian 99,97%, berat jenis $19,070\text{ g/cm}^3$, impuritas unsur-unsur logam penyusun (< spesifikasi nukem) dan dari uji difraksi sinar-X uranium didominasi oleh struktur α -U sebanyak 96,42 % yang tercampur dengan 3,58% UO_2 . Kualitas uranium hasil percobaan sesuai spesifikasi logam uranium Tessag Nuclear Nukem GmbH, namun kualitas tersebut masih dapat ditingkatkan dengan mengubah parameter prosesnya.

Kata kunci: Reduksi kalsiothermik, logam uranium, *slag* CaF_2 , kadar U dan unsur pengotor.

Abstract

PRODUCTION OF UF_4 TO URANIUM METAL REDUCTION PROCESS OF CALSIO THERMIC METHOD. The calsiothermic reduction method is selected in order to manufacture uranium metal to get the product that meets the specifications of nuclear fuel. Experiments conducted by mixing metal powder UF_4 with pure granular Ca (grain size diameter +2mm = 40%, and +2 -6mm = 60%), each as much as 6800g and 2180g (25%Ca metal excesses of stoichiometry). UF_4 and Ca incorporated into the graphite tube, then transferred into the steel tube to be heated inside the furnace reduction. Reduction furnace is heated and held at a temperature of $600^{\circ}C$ for 15 minutes, then lowered to $400^{\circ}C$ to do ignition. The result of the reduction consist of two layers of U metal of the bottom of the cup furnace reduction, while CaF_2 slag layer on top. The uranium metal has a purity of 99.97%, density of 19.070g/cm^3 , impurities constituent metals elements (<specification Nukem) and from X-Ray diffraction test of uranium is dominated by the structure of the alpha-U 96.42% mixed with 3.58% UO_2 . The uranium quality of experimental results to specification uranium metal of Tessag Nuclear Nukem GmbH, but the quality could be improved by changing the process parameters.

Key Word: Calsiothermic reduction, uranium metal, CaF_2 slag, U concentration, impurities element.

PENDAHULUAN

Uranium merupakan salah satu bahan baku untuk pembuatan bahan bakar nuklir, baik untuk bahan bakar reaktor riset maupun reaktor daya. Spesifikasi uranium sebagai bahan bakar sangat ditentukan oleh jenis reaktor penggunaannya dan kemampuan

proses fabrikasinya. Uranium adalah logam padat, berwarna putih keperak-perakan dan mempunyai tiga bentuk kristal dengan sifat yang berbeda-beda yaitu fasa α temperatur rendah bersifat *semi ductile*, fasa β temperatur medium bersifat *brittle*, dan fasa γ temperatur tinggi bersifat *ductile*, sebagaimana ditunjukkan dalam Tabel 1.^[1]

Tabel 1. Fasa, densitas, dan sistem kristal logam uranium ^[1]

Temperatur, °C	Fasa	Densitas, g/cm ³	Sistem kristal	Sifat
25	α	19,070	<i>Orthorhombic</i>	<i>Semi Ductile</i>
662	α	18,369	<i>Orthorhombic</i>	<i>Semi Ductile</i>
662	β	18,170	<i>Tetragonal</i>	<i>Brittle</i>
772	β	18,070	<i>Tetragonal</i>	<i>Brittle</i>
772	γ	17,940	<i>Cubic</i>	<i>Ductile</i>
1100	γ	17,560	<i>Cubic</i>	<i>Ductile</i>

Titik lebur dan titik uap uranium murni masing-masing adalah 1132 dan 3527°C, sedangkan titik lebur semakin menurun seiring bertambahnya impuritas di dalamnya. Logam U sangat reaktif dengan semua unsur non logam membentuk senyawa intermetalik. Reaksi antara uranium dengan gas N₂ pada temperatur dibawah 400°C berlangsung sangat lambat, tetapi reaksi semakin cepat apabila temperatur diatas 800°C membentuk lapisan film U₂N₃, sedang dengan gas H₂ membentuk senyawa UH₃ hampir pada semua jalur temperatur. Logam U bereaksi dengan gas fluorine (F₂) membentuk uranium hexafluoride.^[1]

Logam uranium dapat dibuat melalui proses reduksi uranium oksida menggunakan carbon, elektrolisis chlorida atau fluorida, *dissosiasi thermal* iodida, dan reduksi *thermal* menggunakan logam reaktif. Secara termodinamika, proses reduksi menggunakan carbon, uranium oksida tidak dapat langsung direduksi kecuali pada temperatur tinggi dan uranium carbida yang terbentuk sulit dipisahkan.^[1]

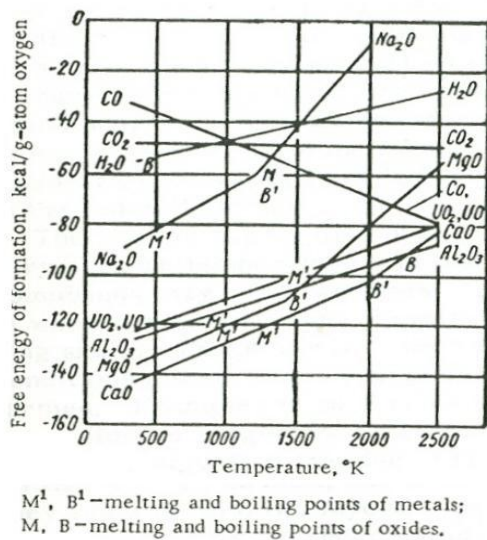
Proses elektrolisis chlorida atau fluorida dihasilkan produk tercampur dengan kontaminan, sedangkan proses *dissosiasi thermal* iodida dikerjakan pada temperatur dan tekanan tinggi serta menghasilkan produk dalam jumlah sedikit, sehingga proses ini hanya cocok untuk pemurnian uranium. Reduksi *thermal* menggunakan logam reaktif sangat sederhana tetapi prosesnya cukup mahal karena bahan pereduksinya harus mempunyai kemurnian tinggi.^[1]

Dari keempat metode tersebut, proses reduksi *thermal* menggunakan logam reaktif banyak digunakan di kalangan industri, karena prosesnya dapat dilakukan pada temperatur dan tekanan rendah serta dihasilkan produk dengan kemurnian tinggi.^[1] Reduksi UF₄ dengan magnesium (Mg) adalah metode yang terpenting dalam produksi uranium masif, sedangkan metoda iodide dan *electrolytic* walaupun tidak diperlukan untuk tujuan komersial tetapi secara ilmiah sangat menarik.^[1,2]

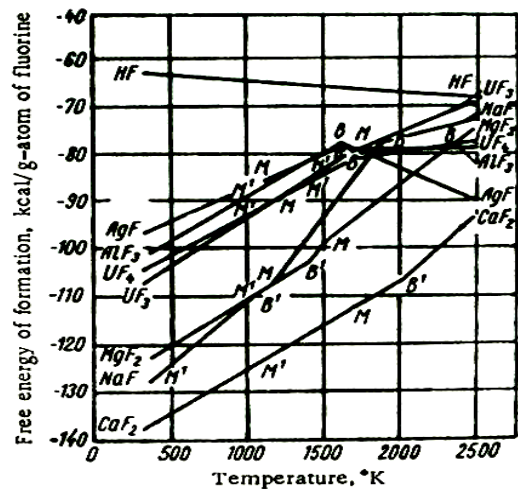
Proses reduksi *thermal* adalah mereduksi unsur tertentu didalam suatu

senyawa menggunakan reduktor kuat pada temperatur dan tekanan tertentu. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam memilih proses reduksi antara lain perbedaan pembentukan energi bebas antara senyawa uranium dengan metal harus cukup besar. Selain itu, reduktor harus tidak larut dalam senyawa uranium atau membentuk senyawa intermetalik dalam jumlah yang besar, produk reaksi mempunyai perbedaan densitas yang cukup besar untuk dapat dipisahkan ketika meleleh, dan penanganan reduktor tidak sulit/tidak beracun.^[1]

Banyak contoh-contoh proses reduksi *thermal*, tetapi dalam hal ini untuk unsur uranium berbentuk senyawa uranium oksida (UO₂/UO₃) dapat dilakukan menggunakan metode karbothermik, elektrokarbothermik, dan silikothermik, atau uranium halida khususnya fluorida (UF₄) dengan pereaksi reduktor seperti logam tanah jarang sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 1 dan 2. Dari Gambar 1 dan 2 terlihat bahwa logam Ca memiliki kelaikan mereduksi paling baik diantara logam-logam yang bereaksi dengan menghasilkan energi bebas pembentukan oksida dan fluorida paling rendah.^[1,2,3]

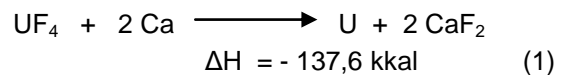


Gambar 1: Energi bebas pembentukan oksida sebagai fungsi temperatur^[1]

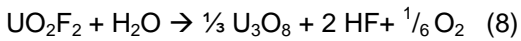
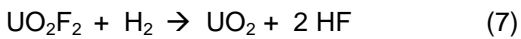
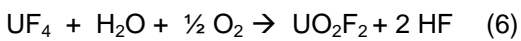
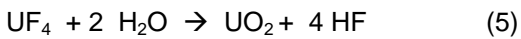
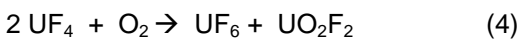
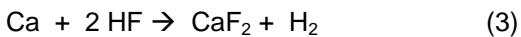
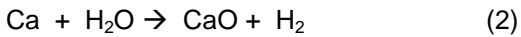


Gambar 2. Energi bebas pembentukan fluorida sebagai fungsi temperatur^[1]

Proses pembuatan logam uranium dengan metode reduksi kalsiothermik menggunakan reduktor logam kalsium (Ca), sebagaimana ditunjukkan dalam persamaan reaksi berikut :



Reaksi ini berlangsung secara spontan dan eksotermik pada temperatur 2240 °C sehingga panas yang dihasilkan mampu mencairkan unsur-unsur reaktan/hasil reaksi (titik lebur CaF₂ = 1418 °C, U = 1132 °C, Ca = 850 °C). Leburan uranium yang memiliki berat jenis tinggi ± 19g/cm³ akan mengalir kebawah karena grafitasi dan membentuk padatan (*regulus*) di dalam cawan lebur, sedangkan unsur logam/senyawa yang memiliki berat jenis lebih rendah bergerak ke atas membentuk padatan (*slag*) CaF₂. Reaksi yang mungkin terjadi selama proses berlangsung adalah sebagai berikut: ^[4,5]



Dari reaksi-reaksi tersebut, terlihat bahwa terbentuknya senyawa impuritas seperti UF_6 , UO_2F_2 , UO_2 , dan U_3O_8 sedapat mungkin dihindari, karena dapat mengurangi kemurnian logam U yang dihasilkan.

Proses pembentukan logam uranium dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain temperatur, kemurnian bahan/reaktan, ukuran partikel reaktan, ekses reduktan, dan lain-

lain.^[6] Prosentase yang lebih tinggi kiranya masih dapat diharapkan dengan memperbaiki faktor-faktor: kualitas bahan (UF_4 , logam Ca), distribusi ukuran partikel UF_4 dan Ca, ekses logam Ca (*excess*) $\pm 25\%$, posisi pemantikan (*igniting*), cara-cara pengisian bahan, pelapisan wadah grafit (*lining*) dengan dextrin pada permukaan bagian dalam dan pemanasan tungku grafit.^[7,8]

Pada percobaan ini akan dievaluasi pengaruh parameter-parameter terhadap proses reduksi kalsiothermik, dengan memperhatikan hasil yang diperoleh dari proses tersebut. Spesifikasi uranium dalam penggunaannya sebagai bahan bakar sangat tergantung dari fabrikator atau reaktor penggunanya. Spesifikasi pengotor di dalam logam uranium yang ditawarkan oleh pemasok Tessag, Nukem Nuclear GmbH disajikan dalam Tabel 2.^[9]

Tabel 2. Kandungan pengotor (ppm) yang diijinkan dalam logam U

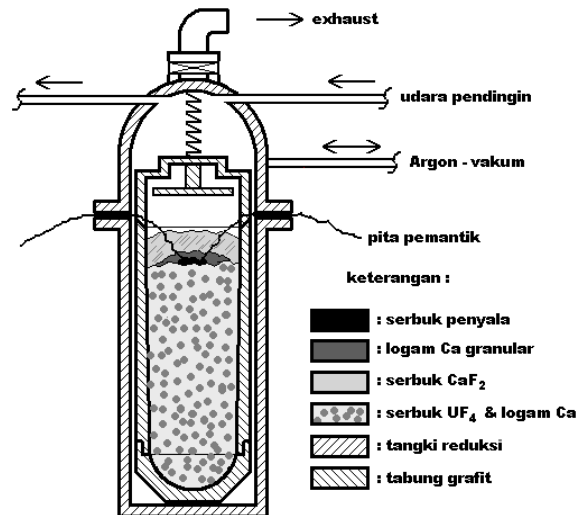
No.	Unsur logam pengotor/ impuritas	maksimum, ppm
1	Al	150
2	B	1
3	Be	10
4	Ca	100
5	Cd	1
6	Co	10
7	Cu	50
8	Cr	50
9	Fe	250
10	Li	10
11	Mg	50
12	Mn	50
13	Ni	100

TATAKERJA

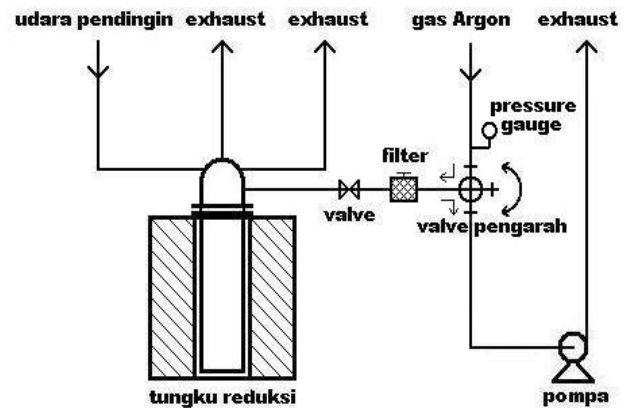
Serbuk UF_4 didegasing pada temperatur $120\text{ }^\circ\text{C}$ selama 2 jam dan dinginkan, kemudian dicampur dengan logam Ca granular (ukuran partikel $<2\text{ mm} = 40\%$, $>26\text{ mm} = 60\%$), dengan kelebihan berat logam Ca = 25 %. Selanjutnya dimasukkan dan dimampatkan ke dalam tabung grafit yang permukaan pada bagian dalam sudah dilapisi dengan larutan dextrin (campuran serbuk $CaF_2 + MgF_2 + \text{dextrin} + H_2O$). Pada permukaan campuran UF_4 dan Ca dipasang pita Mg secara bersilangan sebagai bahan penghantar listrik (untuk pemantikan), dan diatas persilangan pita ditutup dengan serbuk pemantik berupa campuran $BaO + Mg$ (komposisi 1:1), kemudian logam Ca ($\pm 40\text{g}$) dan ditutup dengan serbuk CaF_2 ($\pm 100\text{g}$). Penutup tabung grafit dan tabung baja dipasang dan dieratkan, selanjutnya dimasukkan ke dalam tungku reduksi yang terlebih dahulu dipanaskan pada temperatur $600\text{ }^\circ\text{C}$ selama 6 jam. Temperatur diturunkan ke posisi $400\text{ }^\circ\text{C}$ dan tabung grafit divakum dan disemur gas Ar hingga tekanan 0,2 bar, kemudian dilakukan pemantikan.

- Bila terjadi reaksi, indikator tekanan merespon berupa lonjakan tekanan secara tiba-tiba dan dilanjutkan dengan kenaikan tekanan hingga 2 bar, serta temperatur naik hingga $700\text{ }^\circ\text{C}$.

- Setelah tungku reduksi dingin, rakitan tabung baja dimasukkan kedalam *glove box* untuk pemisahan *regulus* dan *slag*nya. *Regulus* dibersihkan dengan larutan asam acetat 45 % dan air bebas mineral secara bergantian dan dikeringkan. *Regulus* yang sudah kering ditimbang dan dianalisis kadar U dan unsur pengotornya, densitas dan mikrostruktur serta fasa yang terbentuk. Sistem peralatan tungku reduksi, pola proses reduksi dan skema peralatan proses reduksi ditunjukkan pada Gambar 3, 4 dan 5.^[7,8]



Gambar 3 : Sistem peralatan tungku reduksi

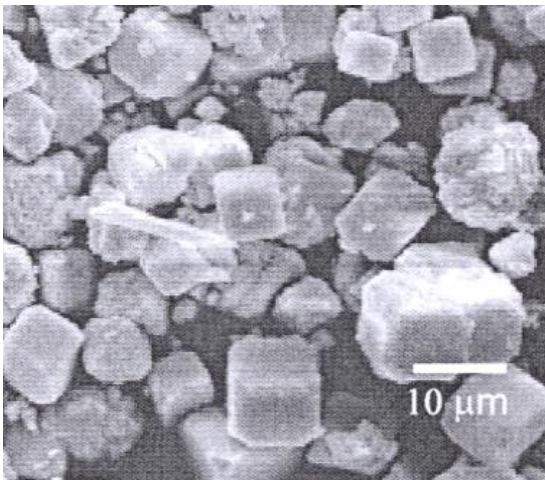


Gambar 5 : Skema peralatan proses reduksi kalsiothermik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Senyawa UF_4 merupakan hasil proses hidrofloklorinasi serbuk UO_2 pada temperatur $500\text{ }^\circ\text{C}$ selama 3 jam berbentuk kristal berwarna hijau cerah. Bentuk kristal UF_4 ditunjukkan pada Gambar 6. Secara teoritis kadar uranium di dalam UF_4 adalah 76,77%, sedangkan hasil analisis sampel (1) dan (2) masing-masing adalah 74,7025 dan 74,75%. Penurunan kadar U dalam ketiga sampel tersebut kemungkinan disebabkan terjadinya

reaksi antara UF_4 dengan H_2O dan O_2 membentuk UO_2 , U_3O_8 dan UO_2F_2 .

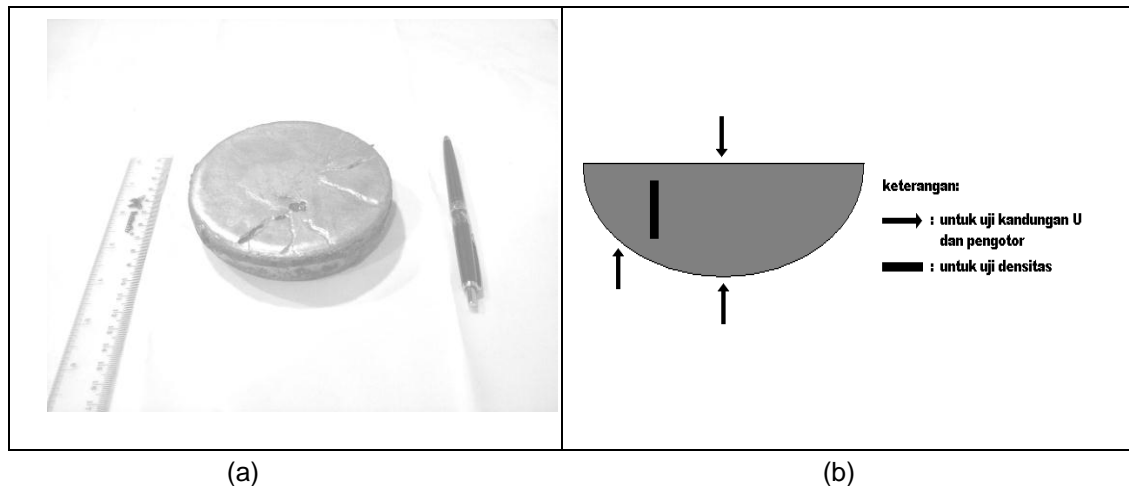


Gambar 6. Mikroskop optik kristal UF_4 hasil hidrofluorinasi

Diameter partikel serbuk UF_4 dan logam Ca serta homogenitas campuran UF_4 dan Ca sangat berpengaruh terhadap keberhasilan proses pemantikan. Secara kinetika kimia, makin halus partikel serbuk luas permukaannya makin besar sehingga bidang kontak antar partikel dan reaksi berlangsung cepat. Pemantikan system peralatan reduksi kalsiotermik pada $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan waktu vakum-sembur selama 75 menit, terjadi proses hubung singkat yang mengakibatkan temperatur di dalam reaktor (tabung grafit) sangat tinggi diatas titik leleh reaktan (UF_4 dan Ca). Pada temperatur tinggi, cairan UF_4 bereaksi dengan cairan Ca membentuk U dan CaF_2 . Cairan logam U mempunyai berat jenis jauh lebih tinggi dibandingkan dengan cairan CaF_2 sehingga uranium mengalir kebawah

akibat gaya grafitasi, sedangkan senyawa CaF_2 yang memiliki berat jenis lebih rendah bergerak ke atas. Pendinginan lelehan/cairan hasil reaksi secara alamiah sehingga seluruh hasil reaksi membentuk padatan dan teramati terbentuk dua lapisan yaitu pada bagian bawah adalah logam uranium, sedangkan lapisan bagian atas berupa slag CaF_2 . Dua lapisan yang terbentuk mudah dipisahkan dengan cara mekanik (pemukulan menggunakan palu) yang dilakukan di dalam *glove boks*. Bentuk logam uranium setengah lingkaran (regulus) seperti bentuk dasar tabung grafit seperti terlihat dalam Gambar 7. Pada saat pencucian regulus dengan asam acetat 45 % dan air demineral, teramati terbentuknya gelembung gas (dalam jumlah sedikit) yang merupakan hasil reaksi antara sisa CaF_2 didalam regulus dengan asam acetat.

Logam uranium yang dihasilkan berwarna putih keperak-perakan, padat (*massive*) dan pada beberapa bagian permukaan terdapat banyak alur. Terbentuknya alur pada beberapa bagian permukaan logam uranium disebabkan pada saat kondisi cair terdapat perbedaan panas yang tinggi antara pusat regulus dan bagian luar, sehingga terjadi aliran panas dari dalam keluar dan meninggalkan alur tersebut. Panas yang masih tinggi pada bagian dalam (pusat) *regulus* akan mendorong gas-gas yang terbentuk dan terjebak dalam cairan uranium selama proses berlangsung untuk bergerak keluar akibat perbedaan temperatur dengan sekeliling *regulus* atau bagian luar wadah grafit.

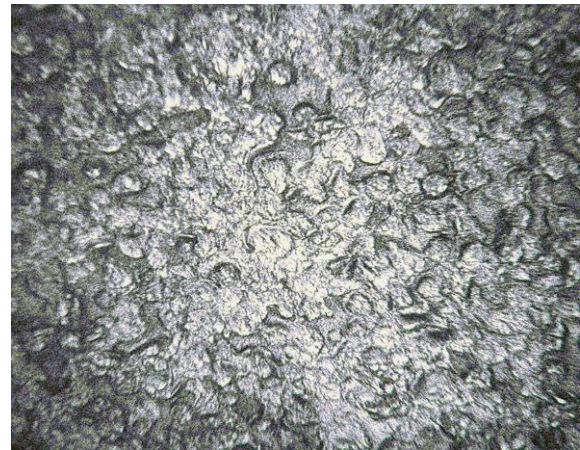


Gambar 7. Logam uranium hasil reduksi kalsiothermik

(a).Regulus uranium

(b) Posisi pengambilan sampel uji

Regulus uranium hasil reduksi kalsiothermik dengan ketebalan sekitar 5 cm, sehingga sulit digunakan berbagai keperluan secara langsung. Oleh karena itu agar uranium tersebut mudah digunakan perlu dilakukan penipisan. Penipisan regulus uranium dilakukan dengan pengerolan. Pengerolan regulus uranium pada temperatur kamar sangat sulit, sedangkan pada temperatur $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ mudah dilakukan. Butiran kristal uranium hasil pengerolan pada temperatur kamar berbentuk halus, sedangkan pada temperatur 600°C bentuk kristal kasar. Pada percobaan ini pengerolan dilakukan pada temperatur $350\text{ }^{\circ}\text{C}$. Proses pengerolan pada temperatur ini lebih sulit dibanding pengerolan pada temperatur $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, hal ini disebabkan kekerasan permukaan lebih tinggi, namun pengerolan pada temperatur $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ lapisan permukaan lebih baik daripada kondisi temperatur kamar atau $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mikrostruktur logam uranium hasil pengerolan regulus pada temperatur 350°C dengan reduksi tebal 94% yang ditunjukkan pada Gambar 8. memperlihatkan bahwa butiran kristal halus dan seragam.

12,5 μm

Gambar 8. Mikrostruktur logam uranium hasil reduksi kalsiothermik

Analisis kadar uranium dilakukan dengan metode titrimetri dan unsur logam impuritas dengan AAS seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Secara teoritis pada percobaan ini akan dihasilkan logam uranium seberat 5000 g/bath, namun dari kedua percobaan ini diperoleh masing-masing 4703,3 dan 4860,0 g. Penurunan produk uranium kemungkinan terikut di dalam slag CaF_2 . Hasil analisis unsur-unsur logam yang terkandung dalam logam masih dibawah batas persyaratan bahan baku bahan bakar nuklir.

Tabel 3. Karakteristik logam uranium hasil proses reduksi kalsiotermik

	impuritas maks, ppm	UF ₄ (1)	UF ₄ (2)
berat logam U, g		4708,3	4860
kadar U, %		99,97	99,04
Unsur logam pengotor, ppm			
Al	150	-	ttd
B	1	-	-
Be	10	-	-
Ca	100	-	9,33
Cd	1	2,286	ttd
Co	10	-	24,99
Cu	50	8,912	ttd
Cr	50	5,591	140,36
Fe	250	40,662	736,65
Li	10	-	ttd
Mg	50	5,104	1,6
Mn	50	ttd	18,39
Ni	100	36,438	817,78

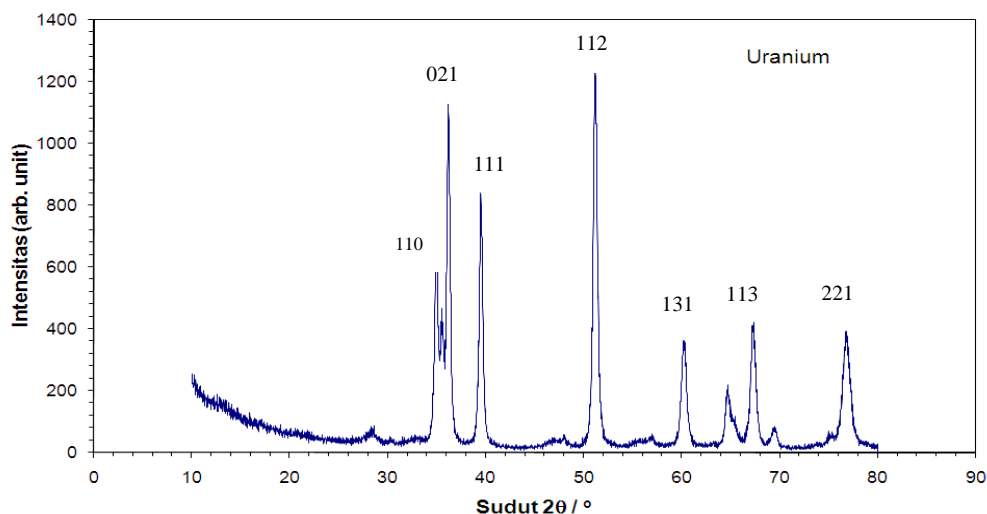
Densitas logam uranium hasil uji menggunakan metode *thru density* diperoleh sebesar 19,038 g/cm³. Nilai densitas tersebut lebih rendah dibanding densitas logam uranium murni sebesar 19,070 g/cm³. Hal ini disebabkan oleh pengaruh impuritas yang terdapat di dalamnya seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Unsur-unsur impuritas tersebut pada proses reduksi kalsiotermik bereaksi dengan uranium membentuk senyawa uranium seperti: U₆Fe, U₆Mn, U₆Ni dan lain-lain yang memiliki berat jenis lebih rendah dari pada logam uranium. Pembentukan senyawa-senyawa tersebut diprediksi sebagai penyebab densitas

uranium hasil reduksi kalsiotermik lebih rendah dari pada uranium murni.

Data pengukuran difraksi sinar-x logam uranium hasil proses reduksi kalsiotermik dan pengerolan pada temperatur 350°C ditunjukkan pada Gambar 9. Dengan mengamati puncak difraksi terlihat bahwa di dalam sampel logam uranium didominasi oleh struktur α -U sebanyak 96,42 % tercampur dengan 3,58% UO₂. Senyawa UO₂ di dalam logam uranium kemungkinan terbentuk pada saat proses pengerolan atau selama penyimpanan mengingat logam uranium sangat reaktif terhadap oksigen. Untuk

menghindari pembentukan oksida uranium

perlu diperhatikan bahwa selama proses pengerolan panas atau penyimpanan perlu dilakukan dalam media gas *inert*.



Gambar 9. Pola Difraksi Sinar-X logam uranium hasil pengerolan pada temperatur 350 °C

SIMPULAN

Pembuatan logam uranium menggunakan metode reduksi kalsiothermik serbuk UF_4 dengan logam Ca (25% berlebih) dan pemantikan pada temperatur 400°C diperoleh produk uranium yang memiliki kemurnian 99,97%, berat jenis 19,070g/cm³, impuritas unsur-unsur logam penyusun sesuai dengan spesifikasi uranium pemasok Tessag Nukem Nuclear GmbH dan dari uji difraksi sinar-X uranium didominasi oleh struktur α -U sebanyak 96,42 % tercampur dengan 3,58% UO_2 .

SARAN

Untuk meningkatkan kualitas produk uranium dari proses reduksi kalsiothermik disarankan beberapa parameter yang perlu diperhatikan yaitu: kualitas bahan baku UF_4 dan Ca, distribusi ukuran partikel, posisi pemantikan, cara pengisian bahan, proses pelapisan, posisi dan pengaturan temperatur pemantikan.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih ditujukan kepada Direksi dan staf PT. Batan *Teknologi* (Persero) yang telah memberikan dukungan bahan dan peralatan proses sehingga percobaan ini dapat dikerjakan di instalasi produksi Elemen Bakar Nuklir (EBN) gedung 60. Ucapan terimakasih juga kepada rekan kerja atas bantuan dan buah pikiran sehingga kegiatan ini dapat diselesaikan.

DAFTAR PUSTAKA

1. GALKIN, N.P., SUDARIKOV, B.N., "Technology of Uranium", Atomizdat, Moskva, 1964
2. WILKINSON, W.D., "Uranium Metallurgy", Uranium Process Metallurgy, Vol. I, International Institute of Nuclear and Engineering, Argonne National Laboratory, 1962
3. MASRUKAN, SURIPTO, A., "Pembuatan UF_4 Dari UO_2 Secara Hidrofluorinasi", Bidang Produksi Elemen Bakar Reaktor Riset, 1988

4. PATRICIA, R.G.,et.al,"*Informe De Magnesiothermia*", Depto Materiales Nucleares Unidad De Conversion, Chile, 2002
5. PATRICIA, R.G.,et.al,"*Processes To Obtain Metallic Uranium From UF₆*", 31st International Meeting on RERTR, Beijing, China, November 1-5, 2009
6. WIDADA, B., WIDODO, G.,"Strategi Memproduksi Logam U Berkualitas", Buletin Daur Bahan Bakar Nuklir URANIA, ISSN 0852-4777, No. 20/Thn. V, Oktober 1999
7. LICENSE AGREEMENT., "Info-transfer BATAN-NUKEM", Process Descriptions Part 2, NUKEM, West Germany, 1982
8. EFP SUPPLY CONTRACT., "*Basic and Detailed Engineering Descriptions*", Process Descriptions Vol. 4, NUKEM, West Germany, 1983
9. JUERGEN LAUCHT," *A New Standard Specification for Uranium Metal Intended for Research Reactor Fuel Fabrication*", 6th International Topical Meeting on RRFM, Ghent, Belgium, March 17 to 20, 2002.
10. KI-HWAN KIM,"*An Investigation of the Fabrication Technology for Uranium Foils by Cooling-roll Casting*", The 25th International Meeting on RERTR, Chicago, Illinois on October 5-10, 2003

LAMPIRAN

Tabel 1. Identifikasi puncak sampel uranium *peaks search of uranium*

No.	Pos. [°2Th.]	FWHM [°2Th.]	Area [cts*°2Th.]	Backgr.[cts]	d-spacing [Å]	Height [cts]	Rel. Int. [%]
1	28.3918	0.6298	23.32	30	3.14363	37.54	3.04
2	32.6368	0.9446	13.04	30	2.74379	13.99	1.13
3	34.9353	0.3149	196.78	31	2.56836	633.53	51.36
4	36.1878	0.3149	330.58	30	2.48229	1064.29	86.27
5	39.5179	0.3936	301.67	23	2.28045	776.95	62.98
6	48.0013	0.4723	13.33	17	1.89537	28.60	2.32
7	51.1581	0.3936	478.97	18	1.78559	1233.60	100.00
8	56.9401	0.4723	12.49	18	1.61724	26.81	2.17
9	60.2563	0.5510	182.34	18	1.53593	335.45	27.19
10	64.6499	0.3936	70.63	20	1.44176	181.90	14.75
11	67.2751	0.5510	209.92	19	1.39174	386.18	31.30
12	69.4643	0.5510	31.66	16	1.35314	58.24	4.72
13	75.1086	0.4723	15.09	17	1.26484	32.39	2.63
14	76.7708	0.7680	362.32	18	1.24052	353.83	28.68

No	Fasa	Formula	Fraction (%)
1	Uranium Oxide	UO ₂	3.58
2	Alpha Uranium	α - U	96.42
			100