

STUDI PROSES PENGAMBILAN ULANG U-Mo DARI PRODUK GAGAL PEB U-Mo/Al SECARA ELEKTROLISIS

Heri Hardiyanti

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

Tugas fungsi dari Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) salah satunya adalah melaksanakan pengembangan teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir. Oleh karenanya dalam rangka mendapatkan material baru yang memiliki densitas tinggi, beberapa material telah diteliti dan salah satu material baru yang sesuai sebagai kandidat bahan bakar nuklir adalah paduan uranium. Bahan bakar U-Mo/Al merupakan bahan bakar tipe pelat yang disiapkan sebagai kandidat pengganti bahan bakar sebelumnya. Selama produksi bahan bakar U-Mo/Al, senantiasa dikenai terhadap kualitas uji bahan dasar, produk setengah jadi, dan produk akhir. Beberapa uji tersebut agar bahan bakar U-Mo/Al dapat memenuhi spesifikasi yang ditentukan. Di luar ketentuan spesifikasi, dianggap sebagai kegagalan produk maka U-Mo yang berada didalamnya harus diambil kembali, agar dari segi ekonomi, akuntabilitas bahan nuklir serta keselamatan lingkungannya juga terpenuhi. Tujuan studi ini adalah untuk memperoleh proses yang efisien dan menguntungkan dengan metoda elektrolisis. Teknik elektrolisis yang digunakan pada studi proses pengambilan ulang U-Mo dari produk gagal PEB (Pelat Elemen Bakar)U-Mo/Al secara elektrolisis dapat dilakukan, karena menggunakan dasar teknik elektrolisis yang ada dan menerapkan beberapa parameter diantaranya : voltage, waktu proses, katoda, konsentrasi elektrolit. Sehingga dengan metoda proses elektrolisis ini diharapkan dapat diperoleh hasil U-Mo yang lebih efisien dan menguntungkan.

Kata Kunci : Pengambilan ulang, U-Mo, gagal, pelat elemen bakar, elektrolisis, elektroda, elektrolit

PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar nuklir (PTBBN) adalah salah satu pusat di bawah Deputi Bidang Teknologi Energi Nuklir (TEN), berdasarkan Keputusan Presiden No.46 Tahun 2013 yang dijabarkan dalam Peraturan Kepala BATAN No.14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja BATAN. PTBBN mempunyai tugas untuk melaksanakan perumusan dan pengendalian kebijakan teknis, pelaksanaan, pembinaan dan bimbingan di bidang pengembangan teknologi fabrikasi bahan bakar nuklir dan teknik uji radiometalurgi. Untuk melaksanakan tugas tersebut, PTBBN menyelenggarakan salah satu fungsinya seperti yang dibebankan pada Bidang Fabrikasi Bahan Bakar Nuklir (BFBBN) yaitu melaksanakan pengembangan fabrikasi bahan bakar nuklir^[14,15]

Bahan bakar reaktor riset terus mengalami pengembangan terutama setelah adanya program RERTR (*Reduced Enrichment Reactor and Testing Reactor*) dan dalam setiap pertemuan yang diadakan selalu membahas tentang pengambilan kembali (*recovery*) produk gagal bahan bakar^[1]. Cara *recovery* konvensional produk gagal bahan bakar masih tetap dilakukan pada skala laboratorium dan teknologi alternatif sedang dalam penelitian yang kesemuanya untuk memperoleh hasil *recovery* yang lebih efisien. Para

peneliti harus mendapatkan bahan bakar dengan pengayaan rendah namun mempunyai densitas uranium tinggi.

Penelitian bahan bakar reaktor riset dengan densitas uranium tinggi telah menarik ilmuwan di dunia dalam rangka mendapatkan material baru yang memiliki densitas tinggi. Beberapa material telah diteliti, dan material baru yang sesuai sebagai kandidat bahan bakar nuklir adalah paduan uranium. Penggunaan bahan bakar dengan uranium pengkayaan tinggi beresiko disalahgunakan untuk dimanfaatkan dalam persenjataan nuklir, sehingga dikembangkan bahan bakar baru menggunakan uranium dengan pengkayaan rendah (<20 % ^{235}U)^[4].

Penelitian pengembangan bahan bakar reaktor riset di dunia terus dilakukan secara berkelanjutan agar kelak diperoleh bahan bakar baru yang mempunyai tingkat muat uranium (TMU) tinggi. Material bahan bakar reaktor riset yang dikembangkan di dunia diantaranya adalah paduan U_3Si_2 , UZr , dan U-Mo . Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN)-Batan, Serpong sedang melakukan penelitian dan pengujian salah satunya bahan bakar U-Mo/Al . Bahan bakar U-Mo/Al merupakan bahan bakar tipe pelat yang disiapkan sebagai kandidat pengganti bahan bakar sebelumnya yaitu $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$ dan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$. Kedua produk bahan bakar tersebut lebih awal dikonsumsi oleh RSG-GAS yaitu bahan bakar bentuk keramik $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$, kemudian produk berikutnya yaitu bahan bakar bentuk logam $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ ^[2].

Pemilihan paduan U-Mo sebagai kandidat bahan bakar reaktor riset memiliki beberapa keunggulan antara lain : penampang lintang serapan neutron unsur Mo rendah, tahan terhadap korosi dan berat jenisnya $> 16,4 \text{ g/cm}^3$, sehingga densitas uranium di dalam bahan bakar dapat ditingkatkan $> 8 \text{ gU/ cm}^3$. Densitas uranium yang tinggi sangat menguntungkan karena muatan ^{235}U di dalam bahan bakar dapat lebih banyak sehingga umur pemakaian dapat lebih lama dan ekonomis ^[3].

Pada setiap proses baik bahan bakar U-Mo/Al maupun bahan bakar lainnya, harus dikenai uji kualitas mulai dari uji bahan dasar, produk setengah jadi hingga produk akhir bahan bakar. Apabila hasil uji yang diperoleh tidak memenuhi persyaratan atau spesifikasi bahan bakar, maka bahan bakar tersebut dianggap sebagai produk gagal. Setiap proses fabrikasi tentunya akan ada produk yang tidak sesuai spesifikasi dan harus diolah ulang. Penelitian dan pengembangan mengenai fabrikasi U-Mo tentunya harus diimbangi dengan penelitian dan pengembangan untuk pengambilan ulang gagal. Agar dari segi ekonomi, akuntabilitas bahan nuklir, serta keselamatan lingkungan terpenuhi, maka U-Mo yang berada dalam bahan bakar U-Mo/Al harus dipungut kembali menggunakan teknologi olah ulang dingin (*cold recovery process*)^[1].

TEORI

Proses pengambilan ulang U-Mo dari gagal PEB U-Mo/Al mengadopsi teknik elektrolisis dengan menggunakan Hukum deret volta's , yang menyatakan bahwa unsur-unsur logam Li, Mg, Al, dan seterusnya (bertindak sebagai anoda), sedangkan di sebelah kanan unsur hidrogen (H) yaitu Cu, Hg, Ag, Pt, dan Au (bertindak sebagai katoda). Dalam hukum tersebut dikatakan pula bahwa semakin ke kanan dari unsur hidrogen semakin kuat menarik/mengikat unsur di sebelah kiri unsur hidrogen ^[11].

Proses pemungutan U-Mo dari gagal PEB U-Mo/Al mengadopsi teknik elektrolisis dengan menggunakan 3 formula/hukum/persamaan :

1. Hukum deret volta's [23-24], yang menyatakan bahwa unsur-unsur logam Li, Mg, Al, dan seterusnya (bertindak sebagai anoda), sedangkan di sebelah kanan unsur hidrogen (H) yaitu Cu, Hg, Ag, Pt, dan Au (bertindak sebagai katoda). Dalam hukum tersebut dikatakan pula bahwa semakin ke kanan dari unsur hidrogen semakin kuat menarik/mengikat unsure di sebelah kiiri unsur hidrogen.
2. Hukum Faraday yang menyatakan bahwa selama proses elektrolisis : (1) massa zat yang diendapkan pada suatu elektroda sebanding dengan besarnya muatan listrik (aliran elektron) yang terlibat dalam sel. (2) massa ekivalen zat yang diendapkan pada elektroda akan setara dengan muatan listrik yang dialirkan ke dalam sel.

Hukum Faraday ditunjukkan pada rumus (1) [23], sebagai berikut :

$$B = \frac{I \cdot t \cdot e}{F} \quad (1)$$

Keterangan,

B = massa zat yang terbentuk, g, I = jumlah arus yang mengalir, A, t = waktu, det
e = massa ekivalen zat yang dibebaskan, g.mol⁻¹.valensi⁻¹ , F = jumlah arus yang diperlukan untuk membebaskan sejumlah grek suatu zat.

Hubungan antara tegangan dan arus dapat dilihat pada rumus (2)[23] berikut ini :

$$I = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Keterangan, I = banyaknya arus, A, V = tegangan, V, dan R = tahanan, Ω

Rumus (2) disubstitusikan ke rumus (1), maka diperoleh rumus (3), sebagai berikut :

$$B = \frac{V \cdot t \cdot e}{R \cdot F} \quad (3)$$

3. Persamaan Nernst bahwa menyatakan bahwa selama proses elektrolisis berlangsung, dapat terjadi proses oksidasi, atau proses reduksi, dan atau dapat terjadi proses kedua-duanya (oksidasi-reduksi). Salah satu proses elektrolisis seperti ditunjukkan pada rumus (3)[23], sebagai berikut :

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{nF} \ln [Me^{n+}] \quad (4)$$

Keterangan ,

E = potensial elektroda, V, E° = standar potensial elektroda, V, n = koefisien electron

R = tetapan gas ideal, $8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$, T = suhu absolut, $(t + 273)^{\circ}\text{K}$,

F = *number Faraday*, $9,6487 \times 10^4 \text{ C mol}^{-1}$, Me^{n+} = konsentrasi unsur/logam/metal

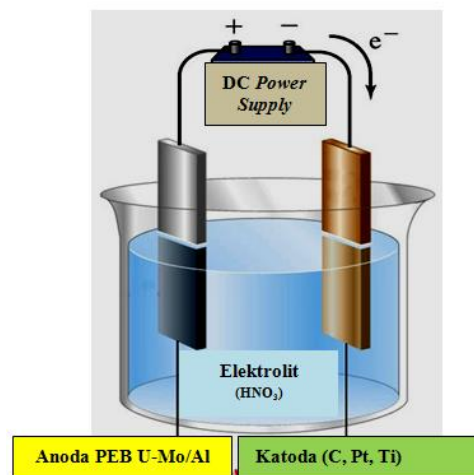
Proses elektrolisis dapat berlangsung baik apabila secara teori dapat mengikuti rumus (5)^[23], sebagai berikut :

$$e. m. f. = [E_1 - E_2] \quad (5)$$

Keterangan,

E = potensial elektroda 1 dan 2, V, e.m.f. = kekuatan *electromotive*, V

Ilustrasi proses *recovery* U-Mo dari gagalan PEB U-Mo/Al menggunakan teknik elektro-lisis seperti ditunjukkan pada Gambar 1^[10], berikut :



Gambar 1 Foto percobaan elektrolisis dari gagalan PEB U-Mo/Al^[18]

METODOLOGI

Proses pengambilan ulang U-Mo dimungkinkan bisa menggunakan beberapa metode. Teknologi pemungutan U-Mo (*recovery*) dalam bahan bakar memerlukan tahapan proses yang panjang (*long recovery process*), meliputi proses-proses berikut : (1) melarutkan kelongsong atau matriks tersebut dalam soda (NaOH 20%) berlebihan^[5].

(2) melarutkan residu U-Mo berimpuritas dalam asam nitrat 11-14 M ^[6], membentuk $UO_2(NO_3)_2$ dan $Mo(NO_3)_2$. (3) melakukan ekstraksi-*stripping* $UO_2(NO_3)_2$ dan $Mo(NO_3)_2$ untuk memisahkan dengan impuritasnya. (4) melakukan evaporasi $UO_2(NO_3)_2$ dan $Mo(NO_3)_2$. (5) melakukan proses konversi kimia meliputi proses pengendapan sekaligus memisahkan antara $UO_2(NO_3)_2$ dengan $Mo(NO_3)_2$ ^[7], karena terdapat perbedaan kondisi proses diantara kedua yaitu pH pengendapan dan suhu proses, sehingga dengan mudah dapat dipisahkan karena $UO_2(NO_3)_2$ mengendap terlebih dahulu. Proses berikutnya $UO_2(NO_3)_2$ proses dikenai hidrofiorinasi, dan akhirnya proses kalsimetri reduksi hasil produk uranium bentuk logam^[8]. (6) merupakan tahap akhir *core* U-Mo dengan jalan melebur logam U dicampurkan dengan serbuk Mo dalam tungku peleburan suhu tinggi kondisi gas *inert* tekanan < 1 atm^[2].

Teknologi alternatif dari kekurangan proses *recovery* U-Mo konvensional tersebut adalah menggunakan teknik elektrolisis (*short recovery process*)^[7], yang diperoleh dari proses ini (teknik elektrolisis) berupa serbuk U-Mo. Penanganan proses dilakukan dengan jalan gagal PEB U-Mo/Al dipotong-potong dan dipakai sebagai elektroda (anoda), sedangkan katoda dapat menggunakan bahan antara lain : grafit (C), platina (Pt), titanium (Ti) dan lain-lain yang dapat dipakai sebagai parameter proses elektrolisis^[7,11,16]. Agar efisiensi proses *recovery* U-Mo cukup baik/tinggi dapat diterapkan parameter yang lain seperti *voltage*, waktu proses, konsentrasi elektrolit, dan lain-lain.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berbagai parameter dipelajari dalam kajian proses pengambilan ulang U-Mo dari gagal PEB U-Mo/Al, diantaranya pemilihan jenis elektrolit yang digunakan HNO_3 , konsentrasi elektrolit, elektroda, waktu proses elektrolisis, *voltage* yang disetting.

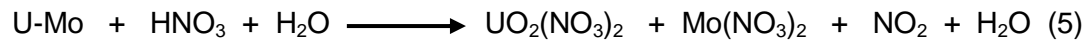
1. Pemilihan jenis elektrolit , Asam Nitrat (HNO_3)

Dalam proses elektrolisis larutan elektrolit HNO_3 terurai menjadi ion-ionnya seperti ditunjukkan pada reaksi (1-2) ^[11] berikut :



Selama berlangsungnya proses elektrolisis pada elektroda akan dilepaskan gas hidrogen (H_2). Untuk menghindari agar tidak terlalu banyak/cepat laju gas H_2 yang mengakibatkan letupan, maka *setting* parameter yang harus diperhatikan adalah penurunan suhu dan penurunan *voltage*, mengurangkan waktu proses serta pengaturan laju pengadukan.

Pada reaksi ionisasi (1) selanjutnya bereaksi dengan Al (*cladding* dan matriks) dari kegagalan PEB U-Mo/Al membentuk reaksi (5-6) dan diawali oleh paduan fisik U-Mo/Al \longrightarrow U-Mo + Al dan reaksi ikatan ion (3-5) ^[6]



Reaksi-reaksi (1-5) tersebut dapat terjadi apabila proses elektrolisis belum dilakukan/dijalankan. Namun apabila sampai proses elektrolisis terjadi kegagalan, maka tetap dapat diperoleh U-Mo meskipun memerlukan proses pengambilan ulang yang panjang (*long recovery process*). Oleh karena itu untuk mengatasi agar dapat terhindar dari terjadinya reaksi (1-3), maka pengaturan parameter proses harus diterapkan sebelum proses dimulai.

Jenis elektrolit HNO_3 dapat menjadi pilihan walaupun selama proses elektrolisis berlangsung timbul gas NO_2 yang berbahaya (tidak ramah lingkungan). Untuk mengatasi gas NO_2 hasil proses tersebut, maka sebelum dibuang ke lingkungan dilakukan penyerapan menggunakan *sistem scrubber*. Hasil penyerapan gas NO_2 dalam *scrubber* terbentuk HNO_3 encer yang dapat dimanfaatkan kembali dalam proses elektrolisis (proses lebih efisien) yang berkelanjutan .

2. Pemilihan jenis elektroda/Katoda

Elektroda dapat berbentuk rod (silinder pejal), batang, atau pelat. Apabila dibandingkan dari ketiga bentuk elektroda tersebut bentuk yang paling baik adalah bentuk pelat, karena mempunyai luas permukaan besar dan melepaskan hasil elektrolisis Al lebih sederhana.

Dalam pemilihan jenis elektroda perlu dipertimbangkan unsur yang akan dipungut, karena berkaitan dengan tingkat ekonomis. Oleh karena itu dipilih elektroda yang selektif terhadap material yang akan diikat dan biasanya elektroda semacam ini dipakai sebagai parameter dalam percobaan elektrolisis. Jadi pada keadaan ini dipilih elektroda Pt, karena elektroda Pt sifatnya inert tidak larut dalam media asam maupun basa yang dipakai sebagai larutan elektrolit^[13].

a. Platina (Pt)

Logam platina memiliki warna perak keabu-abuan, sepintas mirip dengan warna aluminium. Logam ini agak lunak dan mudah ditempa, sehingga banyak digunakan untuk bahan perhiasan (emas putih). Platina memiliki titik leleh yang tinggi (17690C), dan tak

teroksidasi oleh udara pada suhu tinggi, bahkan hingga fase uapnya pun tetap tak teroksidasi. Sifat-sifat Fisika, mempunyai Phase Solid (Padat), Titik Cair : 1768°C, Titik Didih : 3825°C. Platina adalah logam yang paling kurang reaktif. Daya tahannya yang mengagumkan terhadap korosi, bahkan pada suhu tinggi, membuatnya dinobatkan sebagai logam mulia. Logam ini memiliki ketahanan yang sangat baik terhadap korosi, stabil pada suhu tinggi dan memiliki sifat listrik yang stabil. Platina tidak larut dalam asam klorida dan asam nitrat.^[12]

b. Carbon (C)

Karbon sangat tak reaktif pada suhu biasa. Apabila karbon bereaksi, tidak ada kecenderungan dari atom-atom karbon untuk kehilangan elektron-elektron terluar dan membentuk kation sederhana seperti C⁴⁺. Ion ini akan mempunyai rapat-rapatan muatan begitu tinggi sehingga eksistensinya tidaklah mungkin. Mempunyai Titik lebur 4027 °C dan Titik didih 3727 °C^[12]

c. Titanium (Ti)

Titanium merupakan logam transisi yang ringan kuat “lustrous” tahan korosi (termasuk tahan terhadap air laut dan chlorine dengan warna putih-metalik dan keperakan. Logam ini memiliki titik leleh sekitar 1668 ° C dan titik didih 3287 °C. Sifat yang paling menonjol dari Titanium adalah ketahanan logam ini terhadap korosi hampir sama dengan Platinum, logam ini mampu bertahan terhadap gas klorin, serangan asam, dan beberapa larutan garam. Titanium akan lebih tahan terhadap korosi apabila dipadukan dengan logam mulia seperti emas, perak, dan platinum^[12].

3. Parameter parameter voltage dan waktu proses

Selain elektroda yang dipakai sebagai parameter, kondisi proses dipakai juga sebagai parameter yaitu *voltage*, waktu proses. Penggunaan parameter *voltage* dan waktu proses yaitu dinyatakan dengan berat unsur yang diikat/menempel pada elektroda (katoda) berbanding lurus dengan *voltage* dan waktu proses. Hal itu dapat dijelaskan bahwa semakin tinggi *voltage* yang digunakan dan waktu proses semakin lama, hasil yang diperoleh semakin meningkat, demikian sebaliknya. Apabila *voltage* dinaikkan, maka pemakaian arus akan semakin besar, mengakibatkan hasil U-Mo yang diperoleh menurun, karena laju unsur Al yang menuju ke katoda menjadi lebih cepat, sehingga dimungkinkan unsur Al belum sempat menempel sudah terhamburkan dan bercampur dengan U-Mo mengendap didasar larutan elektrolit. Oleh karena itu parameter *voltage* proses elektrolisis harus dicari yang paling baik, agar efisiensi hasil U-Mo yang diperoleh tinggi.

Parameter waktu proses elektrolisis, tentu tidak jauh berbeda dengan parameter *voltage* karena berbanding lurus juga dengan berat hasil yang diperoleh. Hal itu tentu ada waktu maksimum yang harus diupayakan, agar proses elektrolisis menghasilkan U-Mo yang optimum dan menggunakan waktu yang tepat.

Penggunaan kedua parameter ini yaitu *voltage* dan waktu proses sesuai dengan hukum *Faraday* yang menyatakan bahwa efisiensi arus yang terjadi pada proses pelapisan Al menempel pada katoda sangat erat kaitannya dengan arus listrik yang mengalir dalam proses elektrolisis^[7].

KESIMPULAN

Dari hasil pembahasan disimpulkan bahwa teknik elektrolisis yang digunakan pada studi proses pengambilan ulang U-Mo dari produk gagal PEB U-Mo/Al secara elektrolisis dapat dilakukan, karena menggunakan dasar teknik elektrolisis yang ada dan menerapkan beberapa parameter diantaranya : *voltage*, waktu proses, katoda, konsentrasi elektrolit. Sehingga dengan metoda proses elektrolisis ini diharapkan dapat diperoleh hasil U-Mo yang lebih efisien dan menguntungkan.

DAFTAR PUSTAKA

1. J. Figueroa, M.A. Williamson, M.A. Van Kleeck, R.J. Blaskovitz, T.A. Cruse, J.L. Willit, S. Chemerisov, and G.F. Vandegriff, (2011) :”GTRI Progress in Developing Pyrochemical Processes For Recovery of Fabrication Scrap and Reprocessing of Monolithic U-Mo Fuel”, International Meeting on RERTR , Santiago, Chile, October 23-27, 2011
2. Supardjo dan Ghaib Widodo, (2007) :”Kajian Pengaruh Bentuk Butir Serbuk U-Mo Dalam Fabrikasi Bahan Bakar Dispersi U-Mo/Al Tipe Pelat”, Buletin Triwulan Daur Bahan Bakar Nuklir,”URANIA”, PTBN-BATAN, Vol. 13 No. 4, hal. 147-154 Serpong (2007), ISSN 0852-4777, Akreditasi No. : 71/Akred-LIPI/P2MB/5/2007
3. Supardjo, Agoeng Kadarjono, Boybul, (2015) :”Pengaruh Serbuk U-Mo Hasil Proses mekanik dan Hydride – Dehydride- Grinding Mill Terhadap kualitas Pelat Elemen Bakar U-Mo/Al, “URANIA”, PTBBN-BATAN, Vol 21 No.2, juni 2015
4. S. Van den Berghe, A. Leenaers, E. Koonen, L. Sannen, “From high to low enriched uranium fuel in research reactors”, *Advances in Science and Technology*, vol. 73, pp. 78–90, 2010.

5. Y. Yang, B. Gao, X. Hu, Z. Wang, and Z. Shi, (2014) : "Influence of LOI on Alumina Dissolution in Molten Aluminum Electrolyte", *Molten Salts Chemistry and Technology*, DOI: 10.1002/-9781118448847.china. 1h, 11 May 2014
6. Schulz, W.W., (1962) : "Preprocessing Uranium–Molybdenum Alloy Fuels-Dissolution in Concentrated Nitric Acid", HW-64432, UC-10, *Chemistry-Separation Processes for Plutonium and Uranium (TID-4500, 15th Ed)*, Hanford Atomic Products Operation Richland, Washington, copy rate (1962)
7. Lounis, A., Setti, L., Djennane, A., and Melikehi, R. (2007) : "Separation of Molybdenum-Uranium by a Process Combining Ion Exchange Resin and Membrane", *Journal of Applied Sciences* 7 (14), ISSN 1812-5654, Algeria (2007)
8. Youjian Yang, Bingliang Gao, Zhaowen Wang, Zhongning Shi, Xianwei Hu, (2015) : "The Formation and Dissolution of Crust Upon Alumina Addition into Cryolite Electrolyte", *The Journal Of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)*, ISSN: 1047-4838 (Print) 1543-1851, 08 Jul 2015, China
9. Ghaib Widodo dan Prayitno, (2006) : "Pengambilan ulang Serbuk U₃Si₂ Dari Gagalan Produksi PEB Dispersi berisi U₃Si₂-Al Secara Elektrolisis Menggunakan Elektroda Tembaga", *Jurnal Teknologi Bahan Nuklir, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan*, ISSN 1907-2635, Vol. 2 No. 2 Juni 2006
11. L.E. Seran, (2012) : "Hukum Faraday", Universitas Negeri Malang, MIPA, wanibesak-wordpress.com, oktober 2012
12. A. Holda, Z. Kolenda, (2014) : "Mathematical Models Validation Of Aluminium Electrolysis Process Using Exergy Method", *Int. J. of Exergy*, Vol. 15, No. 3, 2014, ISSN: 1742-8297, Switzerland
13. CRC contributors (2007–2008). "Platinum". Dalam Lide, David R. *CRC Handbook of Chemistry and Physics* 4. New York: CRC Press. hlm. 26. ISBN 978-0-8493-0488-0.
14. Anonim, Renstra PTBBN 2015-2019
15. Anonim, Rencana kegiatan BFBBN 2015-2019
16. Ghaib Widodo dan Supardjo, (2007) : "Pemungutan Serbuk U₃Si₂ Dari PEB Dispersi berisi U₃Si₂-Al Secara Elektrolisis Dengan Menggunakan Elektroda Selektif", *Urania Buletin Daur Bahan Nuklir, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan*, ISSN 0852-4777, Akreditasi No. : 71/Akred-LIPI/P2MB/5/2007, Vol. 13 No. 4, Oktober 2007