

STUDI PEMUNGUTAN SERBUK UMo DARI GAGALAN PEB DISPERSI UMo/Al MENGGUNAKAN TEKNIK ELEKTROLISIS

Ghaib Widodo

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

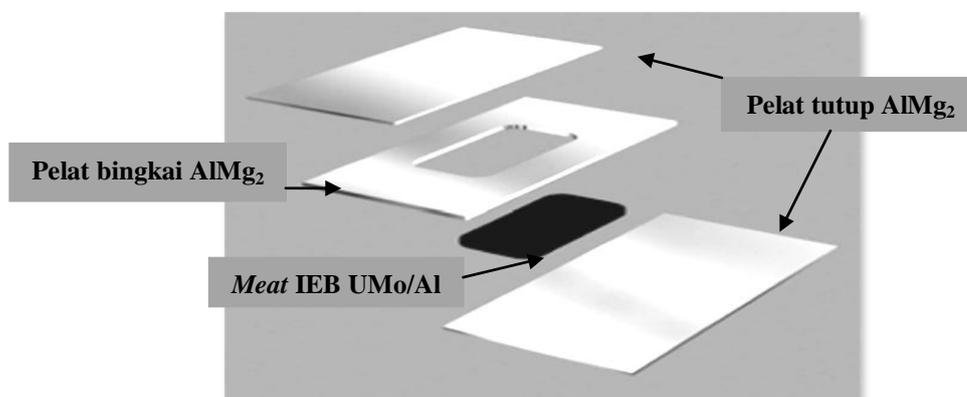
Beberapa keunggulan bahan bakar UMo/Al dibandingkan dengan bahan bakar yang lain yaitu mempunyai densitas lebih tinggi sebesar $16,4 \text{ g/cm}^3$, tahan terhadap korosi, tampang lintang serapan neutron Mo rendah. Namun mempunyai kekurangan pada sifat keuletannya, sehingga sukar dibuat menjadi serbuk, sehingga memerlukan perhatian dalam pengerjaan secara mekanik. Selama proses produksi bahan bakar UMo/Al, banyak pengujian yang harus diterapkan agar diperoleh kualitas uji bahan dasar, produk setengah jadi, dan produk akhir yang memenuhi persyaratan spesifikasi sebagai bahan bakar. Hasil yang diperoleh diluar ketentuan spesifikasi dianggap sebagai gagal produksi, maka UMo yang berada di dalamnya harus dipungut kembali, agar segi ekonomi, keselamatan, akuntabilitas bahan nuklir terpenuhi dan menjadi lebih jelas. Tujuan kajian ini adalah mempelajari metoda pemungutan kembali (*recovery*) UMo dalam UMo/Al yang gagal selama produksi bahan bakar berlangsung. Bahan bakar UMo/Al merupakan kandidat pengganti bahan bakar bentuk oksida $\text{U}_3\text{O}_8/\text{Al}$ ataupun bentuk logam $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ yang telah digunakan sebelumnya di RSG-GAS. Kajian proses pemungutan UMo menggunakan metoda elektrolisis dilakukan dengan cara memotong gagal pelat elemen bakar (PEB) dengan dimensi $625 \text{ mm} \times 70 \text{ mm} \times 1,3 \text{ mm}$, berukuran $10 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ (sebagai anoda), kemudian dicelupkan dalam beker gelas yang berisi 500 mL larutan elektrolit HNO_3 atau NaOH . Katoda digunakan adalah Cu (C, Ag, Pt, SS), selanjutnya dialiri arus searah dari sumber DC *power supply*. Parameter yang digunakan dalam percobaan ini meliputi tegangan (volt), temperatur proses, waktu proses, jarak elektroda, bentuk fisik elektroda, konsentrasi elektrolit. Hasil kajian menunjukkan bahwa waktu berpengaruh terhadap variasi konduktivitas, tegangan, H_2O dan pH. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberi informasi tentang metoda pemungutan UMo dari gagal PEB, sehingga diperoleh kondisi proses yang optimum dan dapat digunakan dalam proses produksi bahan bakar.

Kata Kunci: Pemungutan, uranium-molibdenum, gagal, pelat elemen bakar, elektrolisis, elektroda, elektrolit

PENDAHULUAN

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. Hingga saat ini Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN)-BATAN, Serpong sedang melakukan penelitian dan pengujian salah satunya bahan bakar UMo/Al. Bahan bakar UMo/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 telah digunakan oleh RSG-GAS, namun kedua bahan bakar tersebut masih mempunyai kekurangan, sehingga harus mencari alternatif bahan bakar lain, maka dipilihlah UMo/Al. Karena bahan bakar logam bentuk UMo/Al ini mempunyai densitas lebih tinggi yaitu sebesar $16,4 \text{ g/cm}^3$ ^[1-3]. Keunggulan bahan bakar UMo-Al tahan terhadap korosi, tampang lintang serapan neutron Mo rendah. Namun bahan bakar UMo mempunyai kekurangan yaitu terletak pada keuletannya sehingga sukar untuk dibuat menjadi serbuk lagi, akibatnya memerlukan pengerjaan secara mekanik^[1].

Untuk memperoleh bahan bakar yang handal harus memenuhi spesifikasi seperti ditunjukkan dalam Lampiran 1^[4]. Oleh karena itu, pada setiap proses baik bahan bakar UMo/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 dipersyaratkan atau spesifikasi bahan bakar, maka bahan bakar tersebut dianggap sebagai produk gagal. Agar tinjauan dari segi ekonomi, akuntabilitas bahan nuklir, serta keselamatan lingkungan terpenuhi, maka UMo yang berada dalam bahan bakar UMo/Al harus dipungut kembali menggunakan teknologi olah ulang dingin (*cold recovery process*). Bentuk UMo yang akan dipungut dari PEB UMo/Al ditunjukkan pada Gambar 1^[5].



Gambar 1. Meat UMo/Al dan kelongsong AlMg2^[5]

Saat ini fasilitas telah tersedia di PT. INUKI (Industri Nuklir Indonesia)-Batan, Serpong dan telah dioperasikan untuk memungut kembali uranium dari bahan bakar bentuk oksida. Oleh karena itu apabila produk gagal telah mencukupi kapasitas untuk diproses pada unit pemungutan gagal produksi, maka gagal produksi bahan bakar UMo/Al dapat segera dilakukan proses pemungutannya.

TEORI

Prog RERTR (*Reduced Enrichment Reactor and Testing Reactor*) digulirkan pada setiap pertemuan dan selalu mengetengahkan/membahas tentang *recovery* produk gagal bahan bakar baik *cold recovery process* maupun *hot recovery process* untuk bahan bakar bekas^[5-6]. Cara *recovery* konvensional produk gagal bahan bakar masih tetap dilakukan pada skala laboratorium. Sementara teknologi alternatif sedang dalam kajian dan penelitian yang kesemuanya dapat diperoleh hasil *recovery* yang lebih efisien.

Teknologi pemungutan UMo (*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^[6-11];
2. Melarutkan residu UMo berimpuritas dalam asam nitrat 11-14 M [12-16], membentuk $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Mo}(\text{NO}_3)_2$;
3. Melakukan ekstraksi-*striping* $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Mo}(\text{NO}_3)_2$ untuk memisahkan dengan impuritasnya;
4. Melakukan evaporasi $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dan $\text{Mo}(\text{NO}_3)_2$;
5. Melakukan proses konversi kimia meliputi proses pengendapan sekaligus memisahkan antara $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dengan $\text{Mo}(\text{NO}_3)_2$ [15-17], karena terdapat perbedaan kondisi proses diantara kedua yaitu pH pengendapan dan temperatur proses, sehingga dengan mudah dapat dipisahkan karena $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ mengendap terlebih dahulu. Proses berikutnya $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ proses dikenai hidroflokulasi, dan akhirnya proses kalsimetri reduksi hasil produk uranium bentuk logam^[9];
6. Merupakan tahap akhir *core* UMo dengan jalan melebur logam U dicampurkan dengan serbuk Mo dalam tungku peleburan temperatur tinggi kondisi gas *inert* tekanan < 1 atm^[1-2].

Teknologi alternatif dari kekurangan proses *recovery* UMo konvensional tersebut adalah menggunakan teknik elektrolisis (*short recovery process*)^[17-20], yang diperoleh dari proses ini (teknik elektrolisis) berupa serbuk UMo. Penanganan proses dilakukan dengan jalan gaganan PEB UMo/Al dipotong-potong dan dipakai sebagai elektroda (anoda), sedangkan katoda dapat menggunakan bahan antara lain: tembaga (Cu), grafit (C), kadmium (Cd), perak (Ag), platina (Pt), *stainless steel* (SS), dan lain-lain yang dapat dipakai sebagai parameter proses elektrolisis^[17-18,21-22]. Agar efisiensi proses *recovery* UMo cukup baik/tinggi dapat diterapkan parameter yang lain seperti *voltage*, temperatur proses, waktu proses, jarak katoda, bentuk fisik elektroda, konsentrasi elektrolit, dan lain-lain.

Proses pemungutan UMo dari gaganan PEB UMo/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 unsur di sebelah kiri 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 ekuivalen 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 ekuivalen zat yang dibebaskan, g.mol⁻¹.valensi⁻¹, F = jumlah arus yang diperlukan untuk membebaskan sejumlah gram 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 yang 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^o = standar potensial elektroda, V, n = koefisien elektron

R = tetapan gas ideal, 8,314 J K⁻¹mol⁻¹, T = temperatur absolut, (t + 273)^oK,

F = *number Faraday*, 9,6487 x 10⁴ C mol⁻¹, Meⁿ⁺ = konsentrasi unsur/logam/ metal .

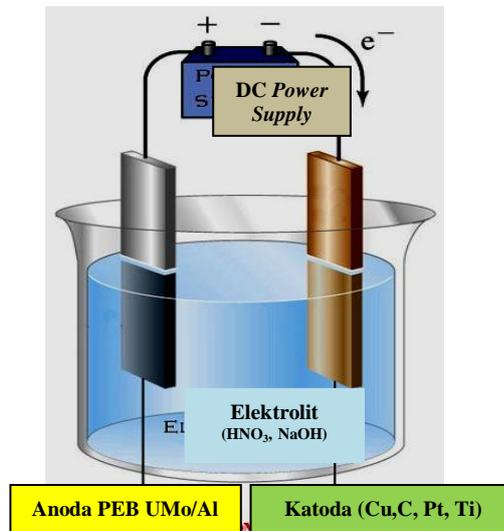
Proses elektrolisis dapat berlangsung baik apabila secara teori dapat mengikuti rumus (5)^[23], sebagai berikut :

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

Keterangan,

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

Ilustrasi proses *recovery* UMo dari gagal PEBA UMo/Al menggunakan teknik elektrolisis seperti ditunjukkan pada Gambar 2^[18], berikut :



Gambar 2. Foto percobaan elektrolisis dari gagal PEBA UMo/Al^[18]

METODOLOGI

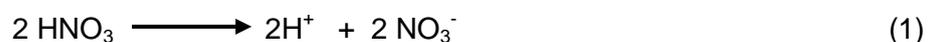
Proses pemungutan UMo menggunakan metoda elektrolisis dilakukan dengan cara memotong gagal PEBA UMo/Al (dimensi 625 mm x 70 mm x 1,3 mm) menjadi berukuran 10 mm x 70 mm (sebagai anoda), kemudian dicelupkan dalam beker gelas yang berisi larutan elektrolit HNO₃ atau NaOH, dan sebagai katoda digunakan Cu, C, Pt, Ti, selanjutnya dialiri arus searah dari sumber DC *power supply*. Dalam percobaan digunakan parameter : 1) *voltage*, 2) temperatur proses, 3) waktu proses, 4) jarak katoda dengan elektroda lainnya, 5) bentuk fisik elektroda, dan 6) konsentrasi elektrolit. Pembahasan dilakukan berdasarkan berbagai pustaka yang menyetengahkan proses elektrolisis dengan berbagai parameter, selanjutnya dilakukan evaluasi dari berbagai parameter tersebut. Parameter-parameter yang dipelajari dalam kajian proses pemungutan UMo dari gagal PEBA UMo/Al diantaranya pemilihan jenis elektrolit yang digunakan (HNO₃, NaOH), konsentrasi elektrolit, elektroda, waktu proses elektrolisis, *voltage* yang disetting, temperatur proses elektrolisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemilihan Jenis Elektrolit

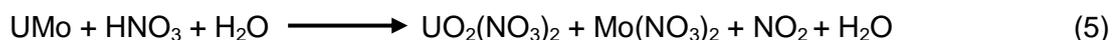
a. Asam Nitrat, HNO₃

Dalam proses elektrolisis larutan elektrolit HNO₃ terurai menjadi ion-ionnya seperti ditunjukkan pada reaksi (1-2)^[23] 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 temperatur dan penurunan *voltage*, mengurangkan waktu proses serta pengaturan laju pengadukan.

Pada reaksi ionisasi (1) selanjutnya bereaksi dengan Al (*cladding* dan matriks) dari gagal PEB UMo/Al membentuk reaksi (5-6) dan diawali oleh paduan fisik UMo/Al \longrightarrow UMo+Al dan reaksi ikatan ion (3-5)^[2,12-16,23]



Reaksi-reaksi (1-5) tersebut dapat terjadi apabila proses elektrolisis belum dilakukan/dijalankan. Namun, apabila sampai proses elektrolisis terjadi kegagalan, maka tetap dapat diperoleh UMo meskipun memerlukan proses pemungutan 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 *scrubahan bakarer*. Hasil penyerapan gas NO_2 dalam *scrubahan bakarer* terbentuk HNO_3 encer yang dapat dimanfaatkan kembali dalam proses elektrolisis (proses lebih efisien) yang berkelanjutan:

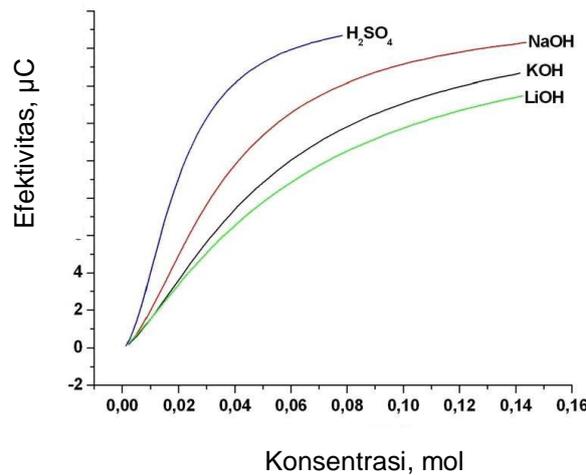
b. Soda Api, NaOH

Dalam kondisi normal, Al (*cladding* dan matriks) dalam PEB UMo/Al bereaksi dengan elektrolit NaOH dan apabila pemakaiannya berlebihan, maka semua Al yang ada dalam PEB larut karena sifat dari Al adalah *amfoter*, sedangkan UMo masih tetap dalam bentuk padatan. Pada kondisi ini campuran UMo dan Al (terlarut) dipisahkan secara filtrasi, kendati UMo yang diperoleh masih mempunyai impuritas, sehingga masih memerlukan perlakuan pemurnian/ekstraksi-*striping*^[6,19], seperti ditunjukkan pada reaksi (6), berikut :



Reaksi (6) pada kondisi normal ini sedikit mengkhawatirkan karena timbul gas H_2 yang perlu penanganan dan dipersiapkan sebelum proses dilaksanakan, misalkan ditambahkan

campuran NaNO_3 (NaNO_2), agar gas H_2 yang timbul dapat dihindari^[6,19]. Reaksi (6) kemungkinan tidak akan terbentuk, karena laju arus listrik (*DC power supply*) akan memacu proses elektrolisis. Akibatnya Al mendahului menempel pada elektroda dan kemungkinan kecil laju kelarutan Al dalam larutan elektrolit (NaOH) dapat diturunkan. Oleh karena itu larutan elektrolit NaOH dapat menjadi alternatif kedua selain larutan elektrolit HNO_3 ^[9,23-24]. Pada Gambar 3 diperlihatkan penggunaan beberapa elektrolit dengan masing-masing efektivitasnya^[24].



Gambar 3. Hubungan antara konsentrasi elektrolit (basa) terhadap harga efektivitas masing-masing elektrolit^[26]

Gambar 3 dapat dijelaskan bahwa pemakaian jenis elektrolit menurut pustaka^[26], hanya NaOH yang mempunyai efektifitas lebih baik dibanding dengan elektrolit KOH dan LiOH , karena NaOH mampu melarutkan semua Al yang ada dalam PEB (UMo/Al). Untuk asam sulfat/ H_2SO_4 tidak dikehendaki karena apabila terjadi kegagalan dalam proses elektrolisis UMo/Al justru akan memperpanjang proses selanjutnya (*ion exchange*, elektrodialisis, dll), apabila dibanding dengan menggunakan elektrolit HNO_3 .

Apabila ditinjau dari segi ekonomi kemungkinan larutan HNO_3 lebih mahal tetapi lebih efisien karena dapat di *recycle* (karena gas NO_2 yang timbul mudah di-*scrub* menjadi HNO_3), sedangkan NaOH lebih murah, tetapi penanganan awal proses agak rumit.

Pemilihan Jenis Elektroda

Elektroda (katoda : Cu , C , Pt , Ti) berfungsi sebagai penangkap Al dan Mg yang berada dalam PEB UMo/Al . Reaktivitas elektroda (katoda) untuk mengikat/menarik Al dan Mg tergantung dari standar elektroda masing-masing elektroda yang digunakan. Standar elektroda metal pada temperatur 25°C , seperti ditunjukkan dalam Tabel 2 (lampiran).

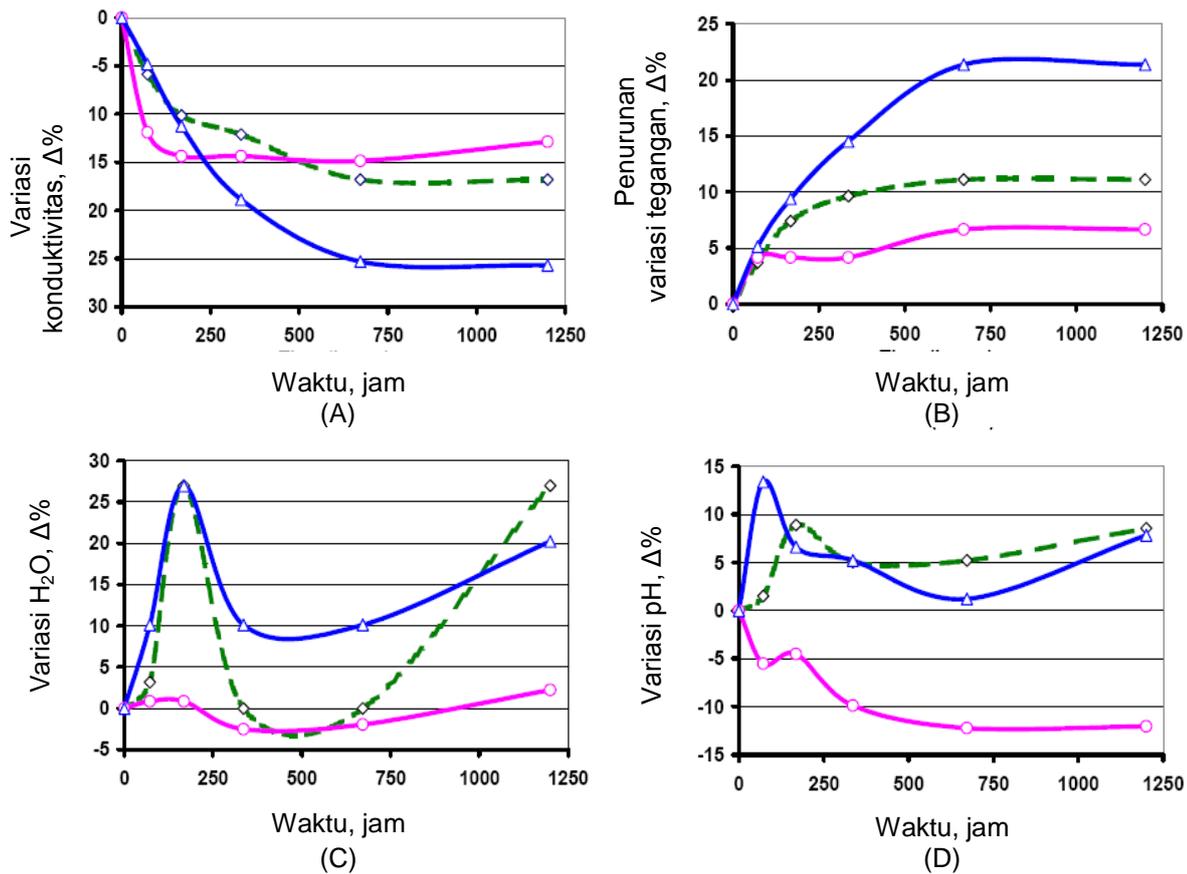
Pada teori yang dikatakan dalam hukum deret Volta's menyatakan bahwa kekuatan unsur (elektroda) di sebelah kanan unsur H_2 (Pt) akan semakin kuat menarik unsur yang berada di sebelah kiri unsur H_2 . Jadi unsur H_2 (Pt) sebagai elektroda dibandingkan unsur Cu kurang kuat ($Au, E^{\circ} = +1.50 V > Pd > Ag > Hg > C > H_2/Pt, E^{\circ} = 0,00 V$). Dengan demikian dapat dikatakan unsur elektroda yang mempunyai kekuatan tertinggi yaitu Au (emas). Namun pada 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.

Parameter Dalam Pengkajian

Selain elektroda yang dipakai sebagai parameter, kondisi proses dipakai juga sebagai parameter mengikuti formula (1-4) yaitu *voltage*, temperatur proses, waktu proses, jarak elektroda, bentuk fisik elektroda, konsentrasi elektrolit.

Penggunaan parameter *voltage* dan waktu proses sesuai dengan rumus (3) yang menyatakan 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 (rumus/formula 2) mengakibatkan hasil UMo 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 UMo mengendap didasar larutan elektrolit. Oleh karena itu parameter *voltage* proses elektrolisis harus dicari yang paling baik, agar efisiensi hasil UMo yang diperoleh tinggi.

Parameter waktu proses elektrolisis, tentu tidak jauh berbeda dengan parameter *voltage* pada rumus (3), karena berbanding lurus juga dengan berat hasil yang diperoleh. Hal itu tentu ada waktu maksimum yang harus diupayakan, agar proses elektrolisis menghasilkan UMo yang optimum dan menggunakan waktu yang tepat. Beberapa grafik yang menggunakan parameter waktu proses elektrolisis yang menggambarkan terjadinya kenaikan dan penurunan tegangan, konduktivitas larutan elektrolit, konsentrasi elektrolit, seperti diperlihatkan pada Gambar 4 ^[27-28].



Gambar 4. Hubungan konduktivitas (A), penurunan tegangan (B), elektrolit (H₂O) (C) dan keasaman elektrolit (pH) (D) terhadap waktu^[27-28]

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^[17].

Parameter temperatur proses elektrolisis, yang disajikan pada rumus (4) yang menyatakan bahwa potensial elektroda bergantung kepada temperatur. Apabila temperatur dinaikkan, maka potensial akan semakin kuat, artinya Al dalam dispersi UMo/Al akan cepat lepas dan segera (menempel) ditarik oleh elektroda. Namun, kenaikan temperatur tentu harus dipelajari/diperhatikan agar tidak menyamai temperatur didih larutan elektrolit yang digunakan. Hal ini dikhawatirkan akibat temperatur tinggi pergerakan larutan elektrolit dapat merusak Al yang telah menempel pada elektroda lepas kembali, sehingga proses elektrolisis gagal.

Parameter bentuk fisik elektroda, 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.

Parameter jarak elektroda, semakin dekat elektroda antara anoda dengan katoda akan semakin cepat proses elektrolisis berlangsung, artinya Al dari UMo/Al akan cepat terlepas dan menempel pada elektroda yang dipilih (dikaji), karena terjadi saling tumbuk-menumbuk diantara Al-nya sendiri. Oleh karena itu jarak elektroda perlu dikaji agar diperoleh jarak yang tepat, sehingga banyak Al yang menempel pada elektroda (anoda) artinya diperoleh hasil UMo yang banyak.

KESIMPULAN

Teknik elektrolisis yang digunakan pada kajian pemungutan serbuk UMo dari gagal PEB dispersi UMo/Al dapat dilakukan dengan cara memotong PEB hingga berukuran kecil kemudian dilarutkan dalam larutan elektrolit, selanjutnya dilakukan proses elektrolisis menggunakan elektroda. Parameter yang dipelajari diantaranya: *voltage*, temperatur proses, waktu proses, jarak katoda, bentuk fisik elektroda, konsentrasi elektrolit. Waktu proses elektrolisis dilakukan sampai 1200 jam dengan variasi konduktivitas, tegangan, H₂O dan pH. Kesemuanya untuk mendukung proses elektrolisis dan diharapkan dapat diperoleh hasil UMo yang optimum dan dapat memberi informasi pada proses yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. Supardjo dan Ghaib Widodo, (2007) :”Kajian Pengaruh Bentuk Butir Serbuk UMo Dalam Fabrikasi Bahan Bakar Dispersi UMo/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
2. Supardjo dan Masrukan, (2007) :”Pembuatan dan Karakteristik Paduan UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Nuklir Tipe Dispersi”, Jurnal Teknologi Bahan Bakar Nuklir, PTBN-BATAN, Vol. 4 No. 2, hal. 48-57 Serpong (2007), ISSN 1907-2635, Akreditasi No. : 82/Akred – LIPI/P2MB/5/2007
3. M. Husna Al Hasa dan Asmedi, S. (1999) :”Karakterisasi Mekanik dan Struktur Mikro UMo Sebagai Kandidat Bahan Bakar Reaktor Riset”, Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar, Serpong 1999
4. PT. Batan Teknologi, (2005) :”Sertifikat Uji, Elemen Bakar Uji (EBU) U₃Si₂/Al Tingkat Muat Uranium 4,5 dan 5,2 g/cm³, No. Dokumen BT021-F01-035, Serpong 2007
5. J. Figueroa, M.A. Williamson, M.A. Van Kleck, R.J. Blaskovitz, T.A. Cruse, J.L. Willit, S. Chemerisov, and G.F. Vandegift, (2011) :”GTRI Progress in Developing Pyrochemical Processes For Recovery of Fabrication Scrap and Reprocessing of Monolithic UMo Fuel”, International Meeting on RERTR , Santiago, Chile, October 23-27, 2011

6. Suroto Ronodirdjo , (1988) :”Proses Ulang Bahan Bakar Bekas”, Diklat Teknologi Industri Bahan Bakar Nuklir, PUSDIKLAT-PEBN- BATAN, Serpong 1988
7. PT. Batan Teknologi, (2005) :”Proses Olah Ulang Gagal Produk (5F)”, BT.121-A01-30306, Petunjuk Pelaksanaan , April 2005
8. Nukem, (1983) :”Basic and Detail Engineering Process Element Fabrication Plant for BATAN”, Vol. 4 Nukem VT. No. 2.0080., Hanau, (1983).
9. 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
10. Youjian Yang, Bingliang Gao, Zhaowen Wang, Zhongning Shi, Xianwei Hu, Jiangyu Yu, (2014) :”Dispersion Caused by Carbon Dioxide During Secondary Alumina Dissolution: A Lab-Scale Research”, Metallurgical and Materials Transactions B, June 2014, Volume 45, Issue 3, pp 1150-1156
11. 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
12. 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)
13. Buchholz, B.A. and Vandegift, G.F, (1965) :”Processing of LEU Targets for Mo⁻⁹⁹ Production–Dissolution of U₃Si₂ Targets By alkaline Hydrogen Peroxide”, International Meeting on RERTR, Prancis, 18-21 September (1995)
14. Ghaib Widodo, (2010) :”Kajian Pemungutan Uranium dari Gagal Kandidat Bahan Bakar UMo-Al Tipe Pelat”, Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia, Seminar Nasional XIII, ISSN : 0854-4778, Akta No. : 24/15/IV/1993, Jogjakarta, 15 Juli 2010
15. www.ajmenrivo.com.au. :”Separation and Recovery of Molybdenum Value From Uranium Process Waste”, United State Patent 4584184
16. Anonim :”Method of Separating Molybdenum From Uranium”, United Statet Patent 4407781
17. 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)
18. L.E. Seran, (2012) :”Hukum Faraday”, Universitas Negeri Malang, MIPA, wanibesak-wordpress.com, oktober 2012

19. G. Svehla, (1985) :”Texbook of macro and semimicro qualitative inorganic analysis”, Vogel’s, Library of Congress Cataloging in Publication Data, New York 1985
20. Ghaib Widodo dan Prayitno, (2006) :”Pemungutan Serbuk U_3Si_2 Dari Gagalan Produksi PEB Dispersi berisi U_3Si_2 -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
21. Ghaib Widodo dan Supardjo, (2007) :”Pemungutan Serbuk U_3Si_2 Dari PEB Dispersi berisi U_3Si_2 -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
22. Kaveh Mazloomi, Nasri b. Sulaiman, Hossein Moayedi, (2012) :”An Investigation Into The Electrical Impedance Of Water Electrolysis Cells-With A View To Saving Energy”, Int. J. Electrochem. Sci., 7 (2012) 3466 – 3481, Malaysia, Iran
23. 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
24. G. Goupil, S. Helle, B. Davis, D. Guay, L. Roué, (2013) :”Anodic behavior of mechanically alloyed Cu–Ni–Fe and Cu–Ni–Fe–O electrodes for aluminum electrolysis in low-temperature KF-AlF₃ electrolyte”, Electrochimica Acta, Volume 112, Canada, 1 December 2013, Pages 176–182
25. Laurent Cassayre, Patrice Palau, Pierre Chamelot, and Laurent Massot, (2010) :”Properties of Low-Temperature Melting Electrolytes for the Aluminum Electrolysis Process”, DOI: 10.1021/-je100214x, *J. Chem. Eng. Data*, France, October 1, 2010, 55 (11), pp 4549–4560
26. Rong Xu, Alfonso Berduque, Zongli Dou, (2009) :”Further Electrolyte Development For High Temperature Aluminium Electrolytic Capacitors”, Electrolytic Innovation Centre BHC Components Ltd (KEMET), Conference, Jacksonville, FL, USA, April 2009, pp. 83-94
27. 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
28. Rebecca Jayne Thorne, Camilla Sommerseth, Arne Petter Ratvik, Stein Rørvik, Espen Sandnes, Lorentz Petter Lossius, Hogne Linga and Ann Mari Svensson, (2015) :”Bubuhan bakar Evolution and Anoda Surface Properties in Aluminium Electrolysis”, Journal of The Electrochemical Society, May 12, 2015. 0013-4651/2015/162(8)/E104/11/Norway

Lampiran 1.

Standar Uji Kualitas IEB dan PEB Sebagai Bahan Bakar [4,20-21]

No.	Parameter Uji	Angka Uji Yang Diterima	
		IEB	PEB
1	Pemeriksaan kandungan U ⁻²³⁵	11,2 - 12,2 g	-
2	Penentuan berat		-
3	Pemeriksaan ketebalan	3,15 ^{±0,05} mm	-
4	Pemeriksaan homogenitas	Spot U < 0,5 m	-
5	Pemeriksaan <i>blister</i> secara Visual	-	$\Phi \leq 1,8 \text{ mm}^2$
6	Pemeriksaan <i>blister</i> Secara Ultrasonik	-	$\Phi \leq 1,8 \text{ mm}^2$
7	Pemeriksaan dimensi luar	-	P = 629 ^{±0,2} mm
8	Pemeriksaan dimensi dalam	-	L = 70,75 ^{±0,15} mm, T = 1,3 ^{±0,07} mm
9	Pemeriksaan distribusi U	-	± 20 %
10	Pemeriksaan kontaminasi permukaan	-	≤ 0,37 Bq/cm ²
11	Pemeriksaan ketebalan kelongsong	-	0,38-0,08 ^{+0,05} mm
12	Pemeriksaan kualitas permukaan	-	Goresan lubang ≤ 80 μm

Kemampuan alat untuk analisis unsur terendah:

Ti = 2,5 ppm, Cd = 0,1 ppm, Cr = 0,1 ppm, Si = 25,0 ppm, Li = 0,05 ppm, dan Co = 1 ppm.

Lampiran 2.

Potensial Standar Elektroda Metal Pada Temperatur 25°C[19]

Reaksi Elektroda	E ⁰ , V	Reaksi Elektroda	E ⁰ , V
Li ⁺ + e ⁻ ⇌ Li	-3.04	Zn ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Zn	-0.76
K ⁺ + e ⁻ ⇌ K	-2.92	Cr ⁺³ + 3e ⁻ ⇌ Cr	-0.74
Ba ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Ba	-2.90	Fe ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Fe	-0.44
Sr ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Sr	-2.89	Cd ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Cd	-0.40
Ca ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Ca	-2.87	Co ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Co	-0.28
Na ⁺ + e ⁻ ⇌ Na	-2.71	Ni ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Ni	-0.25
Ce ⁺³ + 3e ⁻ ⇌ Ce	-2.48	Sn ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Sn	-0.14
Mg ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Mg	-2.37	Pb ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Pb	-0.13
Th ⁺⁴ + 4e ⁻ ⇌ Th	-1.90	2H ⁺² + 2e ⁻ ⇌ H ₂ (Pt)	0.00
Be ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Be	-1.85	Cu ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Cu	+0.34
V ⁺³ + 3e ⁻ ⇌ V	-1.80	Hg ₂ ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Hg	+0.79
Al ⁺³ + 3e ⁻ ⇌ Al	-1.66	Ag ⁺ + e ⁻ ⇌ Ag	+0.40
Mn ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Mn	-1.18	Pd ⁺² + 2e ⁻ ⇌ Pd	+0.99
		Au ⁺³ + 3e ⁻ ⇌ Au	+1.50