

Pemurnian uranyl nitrat hasil pelarutan *yellow cake* menggunakan metoda elektrodialisis

Ghaib Widodo, Guntur Sodikin

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,
Kawasan Puspiptek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Banten, Indonesia
e-mail : ghaibwidodo@yahoo.com
(Naskah diterima 08-01-2015 disetujui 23-01-2015)

Abstract

Purification of uranyl nitrate results of dissolution yellow cake using electro dialysis method. Have performed purification of uranium from yellow cake dissolution results and note that the result of condensation in the form of uranyl nitrate/ $UO_2(NO_3)_2$ is still contains impurities and high levels of nitric acid. The purpose of this study is to conduct purification $UO_2(NO_3)_2$ which still contains impurities by electro dialysis method using a two chamber cell that is cathode and anode chamber and between the chambers inserted two membranes (cation exchange membrane/CEM). Cation exchange membrane serves as a separator between the chamber and also functions as occurrence of ionition. In the process of this electro dialysis using electrodes Pt/Pt (anode and cathode) and the source of electricity supplied from DC power supply. The parameters applied in this uranium purification process using three (3) parameters, acidity ie feed, voltage, and time. In the cathode chamber filled nitric acid (1 N) to bind the uranium ion dioxide into uranyl nitrate in the cathode chamber. The magnefull of the voltage parameters between 3 to 7 volts. While the timing parameters used are from 30 to 120 minutes which interval of 30 minute interval). The best conditions of the electro dialysis process the results obtained at a voltage of 6 volts and a time of 60 minutes at 0.9995 N acidity with the recovery uranium levels in the cathode chamber at 0.0745 g U / L (74.5 mg) or the results obtained in the purification process of purifying uranium from the leaching yellow cake in the cathode chamber of 18.0625 % with high levels of impurities contains in the uranium meet the threshold when used as fuel.

Keywords : *Purification, electro dialysis, electrode, cation exchange membrane, uranium*

Abstrak

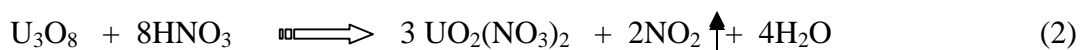
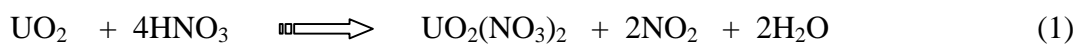
Pemurnian uranil nitrat hasil pelarutan *yellow cake* menggunakan metoda elektrodialisis. Telah dilakukan pemurnian uranium hasil pelarutan *yellow cake* dan diketahui bahwa hasil pelarutan berupa uranil nitrat/ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ tersebut masih berimpuritas dan kadar asam nitrat yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah melakukan pemurnian $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dengan metoda elektrodialisis menggunakan alat sel dua bilik yaitu bilik katoda dan anoda dan diantara keduanya disisipkan membran (membran tukar kation/MTK). Membran tukar kation berfungsi sebagai pemisah antar bilik dan sekaligus berfungsi sebagai media perpindahan ion (migrasi). Dalam proses elektrodialisis ini menggunakan elektroda Pt/Pt (anoda dan katoda) dan sumber listriknya disuplai dari DC power. Parameter yang diterapkan dalam proses pemurnian uranium ini menggunakan 3 (tiga) parameter yaitu keasaman umpam, tegangan, dan waktu. Di dalam bilik katoda diisi asam nitrat (1 N) untuk mengikat ion uranium dioksida menjadi uranil nitrat di dalam bilik katoda. Parameter tegangan antara 3 hingga 7 Volt, sedangkan parameter waktu yang digunakan dari 30 hingga 120 menit dengan interval 30 menit. Kondisi terbaik dari proses elektrodialisis hasil yang diperoleh pada tegangan 6 Volt dan waktu 60 menit pada keasaman 0,9995 N dengan kadar uranium yang terpengut dalam bilik katoda sebesar 0,0745 g U/L (74,5 mg). Hasil yang diperoleh dalam proses pemurnian uranium dari hasil pelarutan *yellow cake* di bilik katoda sebesar 18,0625 % dengan kadar impuritas yang terkandung di dalam uranium telah memenuhi syarat untuk digunakan sebagai bahan baku pembuatan bahan bakar .

Kata Kunci : Pemurnian, elektrodialisis, elektroda, membran tukar kation, uranium

1. Pendahuluan

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan mempunyai tugas dan fungsi untuk pengembangan bahan bakar baik bahan bakar reaktor riset maupun reaktor daya. Khusus untuk reaktor daya menggunakan bahan dasar UO_2 yang berasal dari *yellow cake* yang telah melewati kegiatan proses konversi kimia, proses kendali kualitas, dan proses fabrikasi. *Pilot Conversion Plant* (PCP) adalah merupakan bagian dari instalasi elemen bakar eksperimental (IEBE) yang terdiri dari 6 (enam) unit proses yaitu pelarutan *yellow cake* (*dissolver tank*), filtrasi, ekstraksi-

stripping (*mixer-settler*), evaporasi, pengendapan, dan kalsinasi untuk menghasilkan UO_2 ^[1-3]. Proses pelarutan *yellow cake* dapat berlangsung dengan baik menggunakan larutan asam nitrat dengan nilai antara 7-8 N^[1-2]. Hasil pelarutan berupa uranil nitrat/ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ yang masih mengandung impuritas, sehingga untuk mendapatkan uranium nitrat murni nuklir (*nuclear grade*) harus dilanjutkan pemurnian dengan proses ekstraksi-*stripping*. Selama proses pelarutan *yellow cake* terjadi reaksi dengan persamaan reaksi (1-2)^[1,4].



Teknologi pemurnian uranium yang dikenal dengan istilah proses ekstraksi-*stripping* telah sejak lama dikenal dan diaplikasikan pada pemurnian bahan nuklir

baik melalui proses dingin (*cold process*) maupun proses panas (*hot process*). Ekstraksi-*stripping* yang diterapkan pada proses dingin dipakai untuk memurnikan

uranium hasil eksplorasi dan hasil pelarutan *yellow cake* hingga diperoleh uranil nitrat dan disiapkan untuk dikonversi menjadi UO_2 ^[3-4]. Karena kedua hasil pelarutan baik eksplorasi maupun *yellow cake* tersebut masih mengandung impuritas yang cukup tinggi dan belum memenuhi persyaratan apabila dipakai sebagai bahan bakar. Teknologi proses ekstraksi-*stripping* merupakan proses yang cukup rumit, karena untuk meningkatkan efisiensi proses ekstraksi-*stripping* yang tinggi biasanya memerlukan beberapa (persyaratan) parameter tepat (ketat). Adapun parameter yang diterapkan proses ekstraksi-*stripping* adalah konsentrasi umpan uranium berupa uranil nitrat/ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, keasaman umpan untuk proses ekstraksi maupun proses

stripping, perbandingan TBP/kerosin, laju umpan, frekuensi, amplitudo, suhu proses, dan lain-lain (parameter proses)^[4]. Sekian parameter tersebut harus dipenuhi agar diperoleh hasil proses ekstraksi-*stripping* dapat diperoleh hasil uranium yang maksimum. Oleh karena itu begitu ketat persyaratan yang harus dilakukan dalam proses proses ekstraksi-*stripping* namun masih tetap juga digunakan karena belum ada teknologi pemurnian uranium lain yang mampu menggantikan proses ekstraksi-*stripping* ini. Gambar 1 memperlihatkan proses pemurnian uranium hasil pelarutan *yellow cake* menggunakan kolom *mixer settler*^[2-3] di gedung instalasi elemen bakar eksperimental.



Gambar 1. Rangkaian proses pemurnian uranium menggunakan alat *mixer settler*^[2-3]

Sebagai alternatif untuk mengatasi masalah yang terjadi pada teknologi proses ekstraksi-*stripping*, maka digunakan teknologi elektrodialisis. Sebenarnya teknologi elektro-

dialisis adalah suatu proses untuk pemurnian sesuatu larutan dengan menggunakan sistem elektrodialisis yang dilengkapi dengan membran. Teknologi proses elektrodialisis

pada industri nuklir yang pertama kali dikenalkan oleh Higgins dkk^[5] adalah membuat/memproduksi garam hijau UF_4 dengan cara mereduksi U(VI) menjadi U(IV) murni^[5-11], yang dilakukan pada skala kecil (*pilot plant*). Proses elektrodialisis dikembangkan secara berkelanjutan untuk mendapatkan larutan urano nitrat dari uranil nitrat yang mengandung hidrazin sehingga dapat diaplikasikan pada proses partisi U dan Pu dalam proses PUREX (*plutonium uranium extraction process*)^[5-8]. Untuk memperoleh efisiensi dan kemurnian yang tinggi, maka beberapa parameter harus diterapkan pada proses elektrodialisis seperti : keasaman umpan, tegangan (*voltage*), aliran arus listrik, waktu proses, suhu, jenis elektroda yang

digunakan, jarak elektroda, bentuk elektroda, pendingin, jenis membran sesuai dengan yang disarankan dan informasi dari beberapa pustaka^[12-15,18-24]. Apabila teknologi elektrodialisis dibandingkan dengan metoda/proses ekstraksi-*stripping*, proses elektrodialisis mempunyai kelebihan yaitu prosesnya lebih pendek, hasil lebih murni, tidak banyak menggunakan reagen kimia, lingkungan lebih bersih, dan keselamatan lebih handal. Sebagai contoh sistem instalasi proses elektrodialisis pemurnian uranium dari air laut yang merupakan hasil samping dari proses *water treatment (drinking water)* pada skala *pilot plant* seperti diperlihatkan pada Gambar 2^[16-17].



Gambar 2. Instalasi proses pemurnian uranium dari air laut menggunakan metoda elektrodialisis sistem *barrier*^[16-17]

2. Metodologi

2.1 Bahan yang digunakan

Umpan/sampel yang digunakan dalam proses elektrodialisis adalah uranil nitrat/ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ yang berasal dari hasil pelarutan *yellow cake* yang masih mengandung impuritas dan asam tinggi, formaldehida/ HCOH , dan aquades. Bahan lain yang digunakan untuk analisis adalah asam sulfamat, asam fosfat, fero sulfat, asam nitrat, amonium molibdat, vanadium sulfat, indikator redoks dan kalium bikhromat.

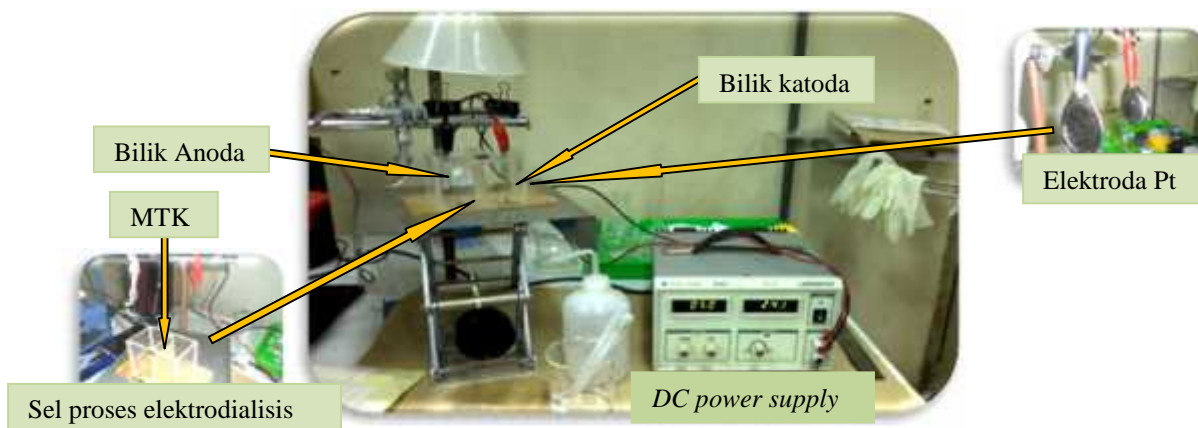
2.2 Alat yang digunakan

Satu unit sel elektrodialisis terbuat dari bahan *flexi glass* berbentuk kotak segi empat terdiri dari dua bilik (bagian) yaitu bilik anoda, bilik katoda, dan diantara keduanya dilengkapi/disisipkan membran tukar kation/MTK^[9], *DC power supply* model PR 680, elektroda platina (Pt), kawat penjepit dan penggantung elektroda, satu unit alat titroprosesor, AAS, dan peralatan gelas.

2.3 Cara kerja

Uranil nitrat hasil pelarutan *yellow cake* yang mengandung $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dilakukan analisis kandungan uranium, impuritas, dan keasamannya. Kemudian ± 250 ml larutan

$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ dengan konsentrasi awal 0,5009 g U/L dimasukkan ke dalam bilik anoda, sedangkan bilik katoda diisi asam nitrat 1 N. Pada bilik anoda dipasang anoda Pt dan bilik katoda dipasang katoda Pt, kemudian dihubungkan dengan *DC power supply*. Setelah power di-*on*-kan, maka arus listrik mulai mengalir sehingga terjadi proses elektrodialisis. Dalam percobaan ini dilakukan dengan menggunakan 3 (tiga) parameter yaitu keasaman umpan, tegangan (*voltage*), dan waktu proses. Setiap proses selesai (pada parameter tertentu), larutan pada kedua bilik (anoda dan katode) dianalisis untuk mengetahui konsentrasi uranium dan keasamannya. Kadar uranium dalam bilik anoda dan bilik katoda dianalisis secara potensiometrik menggunakan alat titroprosesor, sedangkan keasaman pada bilik anoda dianalisis secara titrasi. Penelitian ini diharapkan seluruh ion UO_2^{+2} berpindah dari bilik anoda ke bilik katoda melalui MTK sehingga diperoleh uranil nitrat murni, sedangkan ion asam (NO_3^-) tetap ditinggal di bilik anoda. Unit instalasi yang dipergunakan dalam percobaan elektrodialisis seperti diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Foto proses elektrodialisis pemurnian uranil nitrat hasil pelarutan *yellow cake*

3. Hasil dan pembahasan

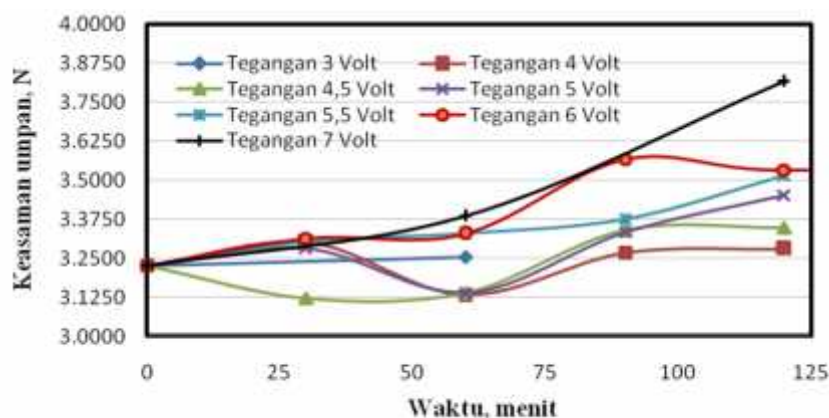
Penelitian proses pemurnian $UO_2(NO_3)_2$ dari hasil pelarutan *yellow cake* ini menggunakan 3 (tiga) parameter proses yaitu keasaman umpan pada kedua bilik (anoda dan katoda), tegangan (*voltage*) dan waktu proses elektrodialisis^[17-20].

3.1. Pengaruh keasaman umpan

Pada bilik anoda, berisi umpan hasil pelarutan *yellow cake* yang berupa $UO_2(NO_3)_2$ berkeasaman cukup tinggi 7-8 N yang sebelumnya telah dilakukan proses destruksi

asam nitrat menggunakan destruktan formaldehida, seperti yang disarankan pustaka^[25-26]. Hal tersebut dilakukan agar kadar asam nitrat dalam umpan (bilik anoda) dapat menurun menjadi 3-4 N, sehingga membran yang digunakan pada proses elektrodialisis tidak cepat rusak dan proses elektrodialisis dapat berlangsung baik.

Hasil analisis penurunan kadar asam nitrat selama proses elektrodialisis yang diperoleh pada bilik anoda seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



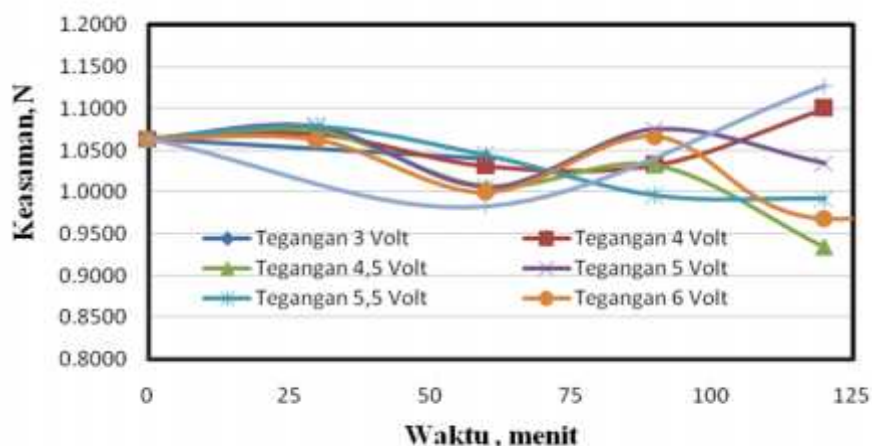
Gambar 4. Hubungan antara keasaman umpan terhadap tegangan dan waktu pada bilik anoda.

Gambar 4 terlihat bahwa pada tegangan antara 3 hingga 7 volt dengan parameter waktu 3 hingga 120 menit dan keasaman umpan 3,250 hingga 3,875 N yang menunjukkan bahwa proses elektrodialisis dikondisikan pada rentang keasaman umpan tersebut. Hal ini dimaksudkan agar apabila dalam proses elektrodialisis terjadi kegagalan, maka kondisi keasaman umpan tersebut masih tetap dapat dilakukan proses ekstraksi-*stripping* ^[4].

Naik-turunnya keasaman umpan dapat terjadi akibat migrasi ion-ion NO_3^- dari bilik anoda lewat membran (MTK) ke bilik katoda yang tidak kontinyu yang disebabkan oleh variasi aliran arus listrik pada berbagai tegangan (*voltage*). Untuk proses

elektrodialisis yang paling cocok/sesuai adalah apabila dioperasikan pada tegangan 6 volt dan diperoleh keasaman—sebesar 0,9995 N seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan untuk grafik yang lain dapat dikatakan keasaman cenderung rendah/menurun dan terus menaik. Hal itu justru tidak dikehendaki karena dapat mengakibatkan proses pemurnian uranium secara teknik elektrodialisis dapat dikatakan gagal (diperlukan proses lanjut).

Pada bilik katoda, berisi asam nitrat encer (1 N) hasil analisis kenaikan kadar asam nitrat selama proses elektrodialisis berlangsung yang diperoleh pada bilik katoda seperti diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Hubungan antara keasaman umpan terhadap tegangan dan waktu pada bilik katoda.

Pada Gambar 5 dapat dilihat bahwa setelah proses elektrodialisis pemurnian $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 / \text{UO}_2^{+2}$ dimulai, kadar asam dalam bilik katoda fluktuatif, karena migrasi ion nitrat

(NO_3^-) dari bilik anoda ke bilik katoda yang tidak kontinyu. Hal ini terjadi pada tegangan 3; 4,5; dan 5 volt seiring dengan bertambah waktu proses elektrodialisis (0-120 menit).

Keasaman pada bilik katoda cenderung menurun, karena kemungkinan ion NO_3^- telah bereaksi dengan ion UO_2^{+2} membentuk $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ murni (analisis impuritas menurun Tabel 1). Sedangkan pada tegangan 4; 5,5; dan 6 volt keasaman dalam bilik katoda justru

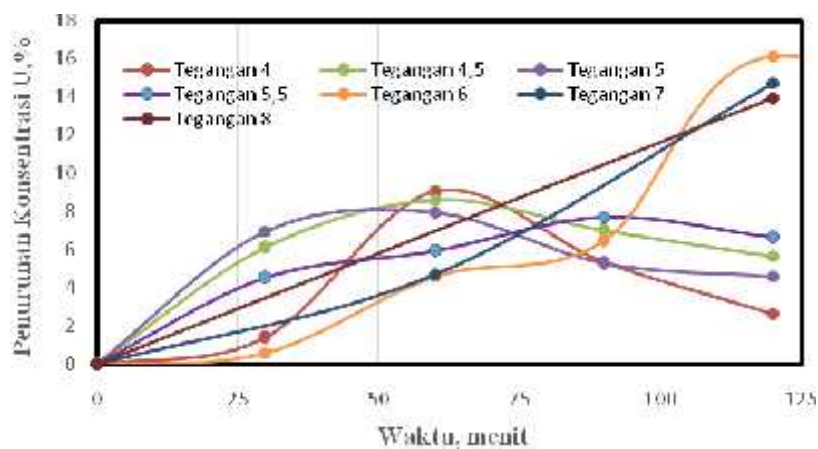
menaik dengan bertambah-lamanya waktu proses. Hal tersebut dimungkinkan reaksi antara ion NO_3^- dengan ion UO_2^{+2} yang telah terjadi dan membentuk ikatan lepas kembali, karena itu keasaman menjadi bertambah naik.

Tabel 1. Hasil analisis kadar unsur impuritas dalam uranil nitrat

No.	Unsur	Kadar Impuritas dalam UN sebelum proses, ppm	Kadar impuritas dalam UN Setelah proses bilik anoda, ppm	Kadar impuritas dalam UN setelah proses bilik katoda, ppm	Batasan maksimum kadar unsur impuritas yang diizinkan sebagai bahan bakar, ppm	Batasan maksimum impuritas oleh ASTM, ppm ^[27]
1	Mn	0,963	0,043	0,081	10	250
2	Fe	5,284	2,265	5,874	100	250
3	Ni	0,702	0,087	0,944	30	200
4	Pb	0,750	0,040	0,010	60	200
5	Cu	0,081	0,088	0,056	20	250
6	Co	0,075	0,013	0,009	75	100
7	Cd	0,001	0,000	0,001	20	-
8	Mg	over	0,937	0,151	50	200
9	Zn	over	0,382	0,115	100	250
10	Cr	0,580	0,088	0,120	100	200
11	Ca	22,677	4,152	4,827	50	200
12	Al	2,850	0,780	0,480	50	250
13	V	0,360	0,460	0,370	5	5
14	Si	0,100	0,400	0,800	60	60
15	Sn	0,280	0,540	0,280	50	50
16	Mo	0,360	0,020	0,010	50	50
17	Ag	0,012	0,005	0,000	1	1
18	Ba	1,340	0,160	0,130	-	-

Pengaruh keasaman umpan pada bilik anoda dan bilik katoda dirangkum dalam Tabel 2. Pada keasaman antara 1,0400 - 1,0065 N (tegangan 3; 4; 4,5 volt) kadar uranium yang diperoleh masih rendah yaitu sebesar 9,3010%. Setelah tegangan dinaikan pada 5; 5,5; dan 6 volt kadar uranium yang diperoleh semakin bertambah hingga 18,0625% dengan keasaman sebesar 0,9995N. Pada kondisi tersebut, kadar uranium paling maksimal, karena di atas tegangan 6 volt kadar uranium yang diperoleh berkurang.

3.2. Pengaruh tegangan dan waktu proses elektrodialisis



Gambar 6 Hubungan antara konsentrasi uranium terhadap tegangan dan waktu

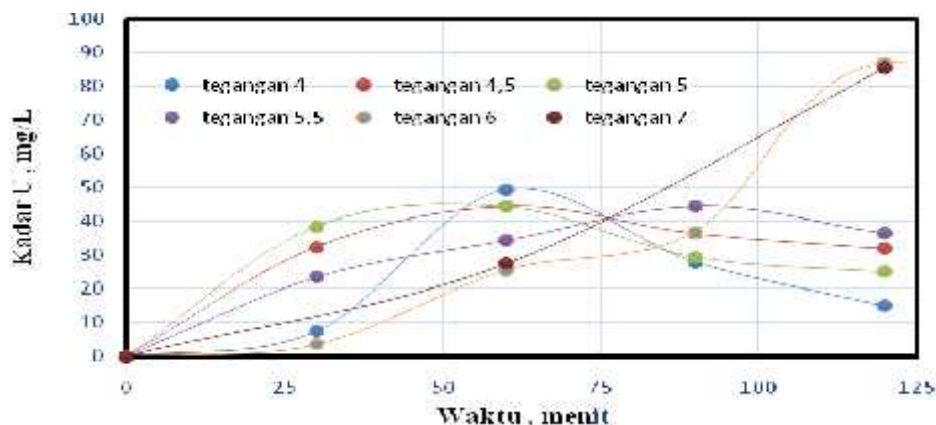
Gambar 6 merupakan hasil analisis permurnian umpan uranyl nitrat dari hasil pelarutan *yellow cake* pada tegangan 4 - 7 volt dan waktu proses antara 30 - 120 menit serta hasil analisis impuritas diperlihatkan dalam Tabel 1.

Proses elektrodialisis yang dilakukan terhadap sampel uranyl nitrat dari hasil pelarutan *yellow cake* dengan konsentrasi uranium awal 0,5009 g U/L, keasaman 3,2540N, waktu proses 60 menit, suhu 60°C dan jarak elektroda 7 cm diperoleh hasil seperti ditunjukkan dalam Tabel 2. Apabila dibandingkan data pada Gambar 6 dan 7, serta Tabel 2, dapat dijelaskan bahwa pada tegangan 4; 4,5; 5; dan 5,5 volt, kadar uranium pada bilik umpan (anoda) masih rendah. Setelah tegangan dinaikkan hingga 6 volt, kadar uranium dalam bilik anoda semakin besar yaitu 18,0625%. Proses tersebut dapat

dijelaskan bahwa penurunan kadar uranium di dalam bilik anoda akan berakibat bertambahnya kadar uranium dalam bilik katoda. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi perpindahan ion uranium yang bermuatan positif dari bilik anoda ke bilik katoda. Dengan demikian telah terjadi pemisahan uranium dari impuritasnya yang ditandai dengan penurunan kadar uranium di bilik anoda. Metoda elektrodialisis ini telah berhasil memisahkan/memurnikan uranium dari hasil pelarutan *yellow cake*. Metode ini diharapkan dapat digunakan untuk memungut uranium dari limbah nuklir cair dalam bentuk efluen proses. Penurunan kadar uranium dalam umpan terbesar terjadi pada tegangan 6 Volt, waktu 60 menit yaitu sebesar 18,0625%, sedangkan konsentrasi uranium dalam ruang katoda 0,0745 gU/L.

Tabel 2. Hasil proses elektrodialisis untuk pemurnian uranil nitrat

Tegangan, volt	Keasaman, N		Kadar U, %
	Bilik anoda	Bilik katoda	
4	3,1330	1,0310	9,0538
4,5	3,1405	1,0065	9,3010
5	3,3130	1,0140	12,8972
5,5	3,3285	1,0440	14,6089
6	3,3285	0,9995	18,0625
7	3,3845	0,9830	9,3295



Gambar 7 Hubungan antara penurunan konsentrasi uranium terhadap tegangan dan waktu

Pada Gambar 7 diperlihatkan penurunan kadar uranium dalam bilik anoda (kenaikan kadar uranium dalam bilik katoda) seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Hasil pemurnian uranium yang diperoleh dari hasil pelarutan *yellow cake* pada proses elektrodialisis ini masih sangat rendah yaitu sebesar 18,0625%, hal itu dikarenakan dalam percobaan elektrodialisis yang dilakukan hanya dengan menggunakan parameter keasaman umpam, waktu, dan tegangan, sedangkan parameter lain seperti jarak dan jenis elektroda, suhu,

pengadukan akan dilakukan penelitian selanjutnya. Penambahan parameter tersebut diharapkan kadar uranium murni yang diperoleh dapat ditingkatkan.

4. Kesimpulan

1. Proses elektrodialisis dapat berlangsung karena telah terjadi perpindahan ion uranil dari bilik anoda ke bilik katoda melalui membran tukar kation (MTK). Perpindahan ini terjadi karena ion uranil (UO_2^{+2}) yang bermuatan positif ditarik oleh katoda negatif.

2. Keasaman umpan dalam bilik anoda berpengaruh terhadap kadar U dalam bilik katoda, khususnya pada tegangan yang relatif tinggi yaitu 5; 5,5; dan 6 Volt. Pada kondisi tersebut, semakin tinggi keasaman, konsentrasi U dalam bilik katoda semakin besar.
3. Tegangan dan waktu elektrodialisis berpengaruh terhadap penurunan kadar uranium dalam umpan uranyl nitrat atau kenaikan kadar uranium dalam bilik katoda. Kenaikan atau penurunan terbesar terjadi pada tegangan 6 V, waktu 60 menit, keasaman pada umpan 3,1405 N yaitu sebesar 18,0625 %, atau konsentrasi U akhir dalam umpan 0,0745 g/L.
4. Parameter yang digunakan sedang 3 (tiga) yaitu keasaman umpan, waktu dan tegangan dalam percobaan pemurnian uranium proses elektrodialisis hasil uranium yang diperoleh sudah murni (impuritas rendah Tabel 1) artinya memenuhi untuk diumpankan sebagai bahan bakar.

5. Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada yang terhormat : Ka. Bidang Bahan Bakar Nuklir, Bpk Sunardi, Bpk Ade Mahpudin, Bpk Yatno Dwi Agus Susanto, Bpk Hendro Wahyono, Ibu Rahmiati, Ibu Mujinem, Bpk Noor Yudhi, dan segenap karyawan/karyawati yang tak dapat penulis

sebut satu persatu yang ikut berpartisipasi hingga penelitian proses elektrodialisis ini dapat diselesaikan.

6. Daftar Pustaka

1. Anwar Muchsin, Ghaib Widodo, (2014). Pengaruh konsentrasi asam nitrat, temperatur proses, laju pengadukan terhadap kadar uranium hasil proses pelarutan padatan *yellow cake* pada seksi 300 di IEBE, URANIA, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, ISSN 0852-4777, Akreditasi No. 395/AU2/P2MBI-LIPI/-04/2012, Vol. 20 No. 2.
2. Operation manual part 4 chemical process from YC dissolution to UNH concentrate, NIRA, Italia, No. Dok. IND 22004Z0007
3. Operation manual part 2 yellow cake handling, NIRA, Italia, No. Dok. IND 22004Z0007
4. Benedict, M., Pigford, T.H., Levi, H.W. (1981), Nuclear chemical engineering, Second Edition, McGraw. Hill Book Company, Toronto, pp.471-476
5. R. Higgins, J. T. Roberts, C. W. Hancher, and J.A. Marinsky, (1958), Preparing uranium tetrafluoride by ion exchange and electrolysis, Industrial and Engineering Chemistry, 50 (3), p. 285-292.

6. Guntur Sodikin, (2015), "Penggunaan Membran Tukar Kation Pada Proses Elektrodialisis Dua Bilik Untuk Pemisahan Uranium Dari Efluen Proses", Tugas Akhir, Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir-Badan Tenaga Nuklir Nasional, Jogjakarta.
7. Fathurrachman, (1995), Solvent extraction as method of promoting uranium enrichment by chemical exchange, Imperial College of Science, Technology and Medicine, Department of Chemical Engineering and Chemical Technology, University of London, London SW7 2BY, United Kingdom
8. Fathurrachman, Fagi, (2001), Elektrokimia dalam industry bahan bakar nuklir, Prosiding Seminar Nasional Elektrokimia, Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan, ISBN 979-96559-0-0, Serpong
9. Fathurrachman dan Wahyono, H. (1999), "Pembuatan U(IV) dari U(VI) menggunakan teknik elektrodialisis", Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V, ISSN 141-1998, P2TBDU-Batan, Jakarta (1999) hal. 193-206
10. E. E. Zaki and H. F. Aly (2000) ,"Enhanced transport of U(VI) and Th(IV) through cation exchange membrane using electric field", Hot Laboratories Centre, Atomic Energy Authority, 13759, Egypt, Seventh Conference of Nuclear Sciences & Applications, Cairo, Egypt.
11. E. E. Zaki, (2002), "Electrodialysis of uranium(VI) through cation exchange membranes and modeling of electro dialysis processes", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry; v. 252(1), ISSN 0236-5731, CODEN JRNCMD, pp. 21-30
12. Sigit, Ghaib Widodo, Ratih Langenati, Torowati, Noor Yudhi (2010), "Pengaruh tegangan, waktu, dan keasaman pada proses elektrodialisis larutan uranil nitrat", J. Tek. Bhn. Nukl., Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan, ISSN 1907-2635, 82/Akred-LIPI/P2MBI5/2007, Vol.6 No.1
13. Ghaib Widodo, Rahmiati (2009), "Pengaruh konsentrasi elektrolit, tegangan, dan waktu, terhadap kadar uranium pada proses elektrolisis PEB U_3Si_2-Al ", J. Tek. Bhn Nukl., Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan, ISSN 1907-2635, 82/Akred-LIPI/P2MBI5/2007, Vol. 5 No. 2.

14. K.V. Protasov, S.A. Shkirskaya, N.P. Berezina, and V.I. Zabolotskii, (2010), "Composite sulfonated cation-exchange membranes modified with polyaniline and applied to salt solution concentration by electrodialysis", Kuban State University, Krasnodar, Rucssia, Published in *Elektrokimiya* Vol. 46, No. 10, pp. 1209-1218.
15. Laura J. Banasiak, Thomas W. Kruttschmitt, Andea I Schafer, (2007), "Desalination using electrodialysis as a function of voltage and salt concentration", Conference on Desalination Strategies in South Mediterranean Countries, Cooperation Between Mediterranean Countries of Europe and Southern Rim of The Mediterranean, France.
16. K. Kesore, F. Janowski, and V.A. Shaposhnik, (1997), " Highly effective electrodialysis for selective elimination of nitrates from drinking water", *Journal of Membrane Science*, 127(1).
17. M. Montana', A. Camacho, I. Serrano, R. Devesa, L. Matia, I. Vallés (2013), "Removal of radionuclides in drinking water by membrane treatment using ultrafiltration, reverse osmosis and electrodialysis reversal", *Journal of Environmental Radioactivity* Volume 125.
18. Zakrzewska-Trznadel, G., Harasimowicz, M., Chmielewski, A. G., (2001), "Membrane processes in nuclear technology-application for liquid radioactive waste treatment", *Sep. Purif. Technology*.
19. International Atomic Energy Agency, (2004), "Application of membrane technologies for liquid radioactive waste processing", Technical reports series No. 431, Vienna, Austria.
20. Ghaib Widodo, Hendro Wahyono, Ratih Langenati, dan Sigit (2010), "Aplikasi metoda elektrodialisis untuk memisahkan uranium dari efluen proses", *URANIA, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, ISSN 0852-4777, Akreditasi No. 265/AU1/P2MBI/05/2010, Vol. 16 No. 3
21. Wahyono, H., Widodo, G. dan Sunardi (2011), "Penggunaan metoda elektrodialisis dalam pemisahan uranium dari efluen proses", *Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII*, ISSN 1978-0176.
22. Zakrzewska-Trznadel, G., (2006). *Membrane processes for environmental protection: applications in nuclear technology. Nukleonika*, (51), (Supplement 1), S101-S111.

23. Mahendra, Ch., Suranjan, B., Anand Babu, C., Rajan, K.K. (2012), "Separation of cesium from simulated high level waste using electro dialysis ion exchange", Proceedings of DAE-BRNS biennial symposium on emerging trends in separation science and technology, Mumbai (India).
24. Valero, F., Tous, J.F. & Arbós, R. (2010), "Mejora de la calidad salnitaria del agua durante el primer año de explotación de la etapa de electro dialisis reversible (EDR) en la ETAP del llobregat", Proceedings of the VII Congreso AEDYR, Barcelona
25. Ghaib Widodo, Nur Fitria Hanggari, (2010), "Pengaruh formaldehida terhadap penurunan konsentrasi asam nitrat dan kenaikan kadar uranium dalam efluen proses", J. Tek. Bhn. Nukl., Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan, ISSN 1907-2635, 261/AU1/P2MBI/-05/2010, Vol. 6 No. 2
26. Ghaib Widodo, Bambang Herutomo, (2010), "Destruksi asam nitrat dalam efluen proses dengan menggunakan bermacam-macam destruktan", URANIA, Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, ISSN 0852-4777, Akreditasi No. 265/AU1/P2MBI /-05/2010, Vol. 16, No. 4.
27. Annual Book of ASTM Standards (2002), "Section twelve, nuclear, solar, and geothermal energy", Volume 12.01 Nuclear energy (I)