

PEMURNIAN URANIL NITRAT HASIL PELARUTAN *YELLOW CAKE* MENGGUNAKAN METODA ELEKTRODIALISIS

Ghaib Widodo¹⁾, Guntur Sodikin²⁾

1) Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN,

2) Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir-BATAN,

ABSTRAK

Telah dilakukan pemurnian uranium hasil pelarutan *yellow cake* dari hasil pelarutan berupa uranil nitrat atau $UO_2(NO_3)_2$ yang masih berimpuritas dan mengandung kadar asam nitrat yang tinggi. Tujuan penelitian ini adalah melakukan pemurnian $UO_2(NO_3)_2$ berimpuritas dengan metoda elektrodialisis. Pemurnian dilakukan 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 tempat terjadinya perpindahan ion (migrasi). Proses elektrodialisis ini menggunakan elektroda Pt/Pt sebagai anoda dan katoda dan sumber listriknya disuplai dari DC power. Parameter yang diterapkan dalam proses pemurnian uranium ini menggunakan 3 (tiga) parameter yaitu keasaman umpan, 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 yang digunakan antara 3 hingga 7 Volt, sedangkan parameter waktu yang digunakan dari 30 hingga 120 menit dengan interval 30 menit. Kondisi relatif baik dari proses elektrodialisis 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) atau hasil yang diperoleh dalam proses pemurnian uranium dari hasil pelarutan *yellow cake* di bilik katoda sebesar 18,063% dengan kadar impuritas terkandung di dalam uranium memenuhi batas ambang apabila digunakan sebagai bahan bakar.

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

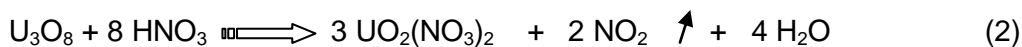
PENDAHULUAN

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-BATAN mempunyai tugas dan fungsi untuk pengembangan bahan bakar baik bahan bakar untuk reaktor riset maupun reaktor daya. Khusus untuk bahan bakar reaktor daya digunakan bahan dasar UO_2 yang berasal dari hasil pelarutan *yellow cake* yang telah melewati beberapa kegiatan proses konversi kimia, proses kendali kualitas, dan proses fabrikasi.

Pilot Conversion Plant (PCP) adalah salah satu unit yang berada di Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE) yang menangani proses pelarutan *yellow cake*. Unit PCP tersebut terdapat 6 (enam) kegiatan proses yaitu proses pelarutan *yellow cake* (*dissolver tank*, DI-301), proses filtrasi, proses ekstraksi-*stripping* (*mixer-settler*), proses evaporasi, proses pengendapan, dan proses kalsinasi yang menghasilkan UO_2 ^[1-3].

Proses pelarutan *yellow cake* dapat berlangsung dengan baik menggunakan larutan asam nitrat antara 7-8 M^[1-2]. Hasil pelarutan berupa uranil nitrat/ $UO_2(NO_3)_2$ dan merupakan uranil nitrat kotor (masih berimpuritas) seperti yang terjadi pada persamaan reaksi 1-2. Oleh karena itu untuk mendapatkan uranium nitrat murni nuklir (*nuclear grade*) harus dikenai proses ekstraksi-*stripping*. Selama proses pelarutan bahan baku padatan *yellow cake* (di dalam *yellow cake* didominasi oleh UO_2 yang tercampur U_3O_8 kendati

jumlah sangat kecil). Proses pelarutan *yellow cake* dengan HNO_3 terjadi kurang lebih mengikuti persamaan reaksi (1-2)[1,4], berikut :



Proses pelarutan *yellow cake* campuran antara UO_2 dengan U_3O_8 keduanya menghasilkan $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$, mengeluarkan gas NO_2 sehingga memerlukan *scrubber* sebagai menyerapnya. Bedanya asam nitrat yang digunakan sebagai pelarut U_3O_8 lebih banyak dibandingkan dengan pelarutan UO_2 , namun hal tersebut tidak banyak berpengaruh karena U_3O_8 jumlahnya relatif kecil.

Fasilitas PCP saat ini telah selesai dilakukan *commissioning* dan telah dioperasikan. Salah satu unit tersebut yang pertama dioperasikan adalah unit pelarutan *yellow cake* [2-3]. Unit PCP ini diharapkan mampu menangani hasil dari proses pelarutan sebagai umpan pada proses ekstraksi-*stripping* hingga dihasilkan uranium murni nuklir (*nuclear grade*) yang siap sebagai umpan bahan bakar.

Teknologi pemurnian uranium dikenal dengan istilah proses ekstraksi-*stripping* telah lama dikenalkan dan telah diaplikasi pada bahan bakar baik pada proses dingin (*cold process*) maupun proses panas (*hot process*). Ekstraksi-*stripping* yang diterapkan pada proses dingin (*cold process*) dipakai untuk memurnikan uranium hasil eksplorasi dan hasil pelarutan *yellow cake* hingga diperoleh uranil nitrat disiapkan untuk dikonversikan menjadi UO_2 [3-4]. Kedua hasil pelarutan baik eksplorasi maupun *yellow cake* tersebut masih mengandung impuritas yang cukup tinggi sehingga belum memenuhi persyaratan untuk digunakan sebagai bahan bakar.

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 pada 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]. Seluruh parameter tersebut harus dipenuhi agar diperoleh hasil uranium yang maksimum. Oleh karena itu walaupun begitu ketat persyaratan, 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] yang ada di Instalasi Elemen Bakar Eksperimental (IEBE).



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

Sebagai alternatif untuk mengatasi kerumitan yang terjadi pada proses ekstraksi-*stripping*, maka digunakan teknologi elektrodialisis. Sebenarnya teknologi elektrodialisis adalah suatu proses untuk pemurnian sesuatu larutan berimpuritas dengan menggunakan sistem elektrolisis yang dilengkapi dengan membran.

Teknologi proses elektrodialisis pada industri nuklir yang pertama kali dikenalkan oleh Higgins dkk^[4] yaitu membuat/memproduksi garam hijau UF_4 . Hasil garam hijau UF_4 yang diperoleh dengan cara mereduksi $U(VI)$ menjadi $U(IV)$ murni ^[3-9], walaupun masih dilakukan pada skala kecil (*pilot plant*). Proses elektrodialisis tersebut secara terus menerus dikembangkan hingga untuk mendapatkan larutan urano nitrat dari uranil nitrat yang mengandung hidrazin dapat diaplikasikan pada proses partisi U dan Pu dalam proses PUREX (*plutonium uranium extraction process*) ^[3-6].

Pada penelitian ini diharapkan dapat memurnikan uranium dari bilik anoda yang berpindah ke bilik katoda, karena ion uranil (UO_2^{+2}) ditarik oleh katoda sedangkan ion asam (NO_3^-) tetap ditinggal di bilik anoda. Untuk memperoleh efisiensi yang tinggi (hasil murni), 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 yang digunakan, dan lain-lain, sesuai dengan yang disarankan dan pernah dilakukan oleh peneliti sebelumnya ^[10-13, 16-22].

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. Sistem instalasi proses elektrodialisis pemurnian uranium dari

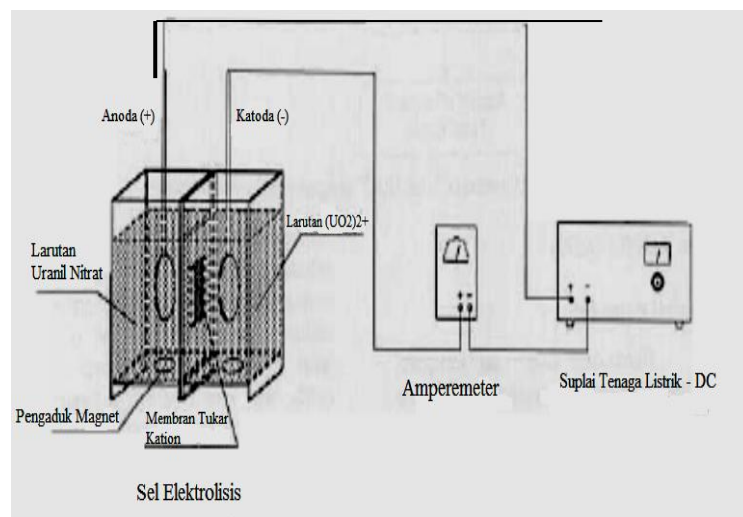
air laut yang merupakan hasil samping dari proses *water treatment (drinking water)* pada skala *pilot plant* seperti diperlihatkan pada Gambar 2 ^[14-15].



Gambar 2. Proses pemurnian uranium dari air laut menggunakan metoda elektrodialisis sistem *barrier* ^[14-15]

METODOLOGI

Umpan atau 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 berimpuritas dan mengandung asam tinggi, formaldehida/ HCOH , aquades.

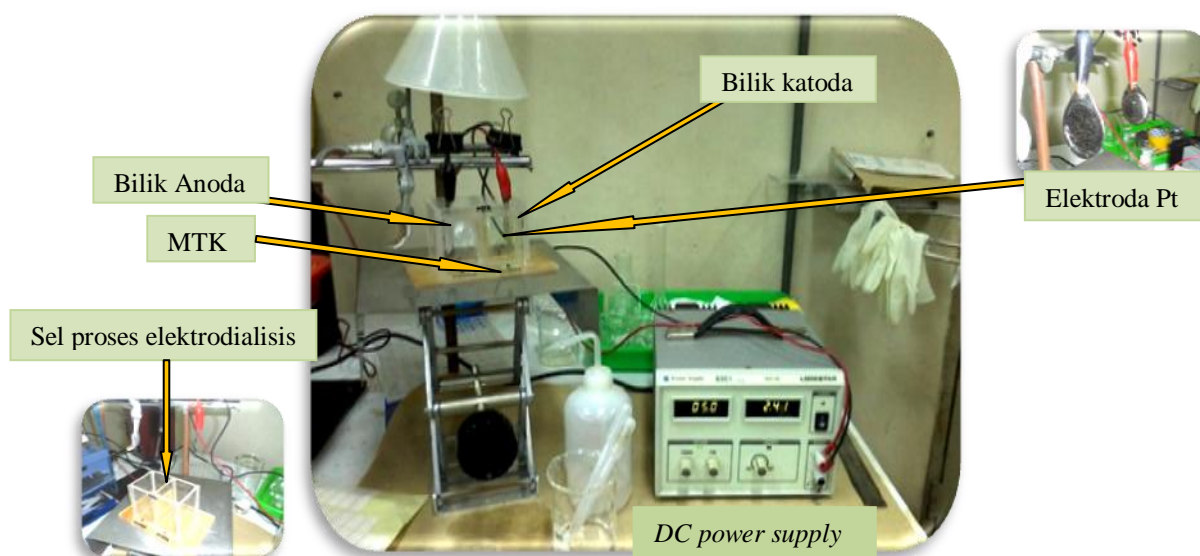


Gambar 3. Sistem proses pemurnian uranium secara elektrodialisis ^[7]

Bahan lain yang digunakan untuk analisis adalah asam sulfamat, asam fosfat, fero sulfat, asam nitrat, amonium molibdat, vanadium sulfat, indikator redoks dan kalium bikromat. Peralatan yang digunakan adalah 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 dengan membran membran tukar kation/MTK [7], *DC power supply* model PR 680, elektroda platina (Pt), seperti diperlihatkan pada Gambar 3, kawat penjepit dan penggantung elektroda, satu unit alat titroprosesor, AAS, dan peralatan gelas.

Uranyl nitrat hasil pelarutan *yellow cake* yang mengandung $UO_2(NO_3)_2$ dilakukan analisis kandungan uranium, impuritas dan keasamannya. Larutan $UO_2(NO_3)_2$ sebanyak ± 250 mL dengan konsentrasi awal 0,5009 g U/L dimasukkan ke dalam bilik anoda dan dalam bilik katoda yang diisi dengan asam nitrat encer (1 N). Pada ruang anoda dipasang Pt sebagai anoda dan pada 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 penelitian ini menggunakan 3 (tiga) parameter yaitu : keasaman umpan, tegangan (*Voltage*), dan waktu proses. Pada setiap proses selesai (parameter tertentu) pada bilik umpan/anoda dilakukan analisis untuk mengetahui konsentrasi uranium dan keasamannya, analisis yang sama dilakukan juga pada bilik katoda.

Kadar uranium dalam bilik umpan (anoda) dan bilik katoda dianalisis secara potensiometrik menggunakan alat titroprosesor, sedangkan keasaman pada bilik anoda dianalisis secara titrasi konvensional. Peralatan proses elektrodialisa yang dipergunakan seperti diperlihatkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Peralatan proses elektrodialisa pemurnian uranyl nitrat hasil pelarutan *yellow cake*

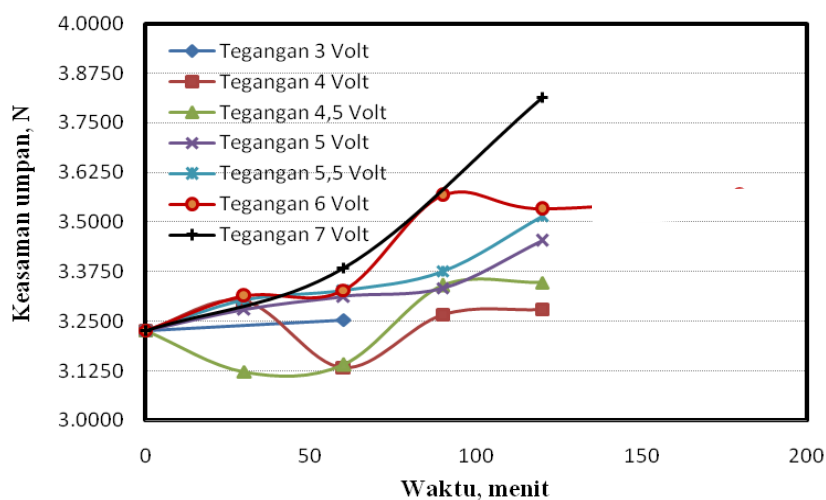
HASIL DAN PEMBAHASAN

Telah diperoleh hasil proses pemurnian $UO_2(NO_3)_2$ dari hasil pelarutan *yellow cake* dengan menggunakan 3 (tiga) parameter proses yaitu keasaman umpan pada kedua bilik (anoda dan katoda), tegangan (*Voltage*) dan waktu proses elektrodialisis^[15-18]. Pengaruh masing-masing parameter proses pemurnian uranium dari hasil pelarutan *yellow cake* dengan menggunakan metoda elektrodialisisdijabarkan seperti pembahasan berikut.

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^[23-24]. Hal tersebut dilakukan agar kadar asam nitrat dalam umpan (bilik anoda) dapat menurun menjadi 3-4 N, sehingga tidak mengakibatkan membran yang digunakan pada proses elektrodialisis 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 5.

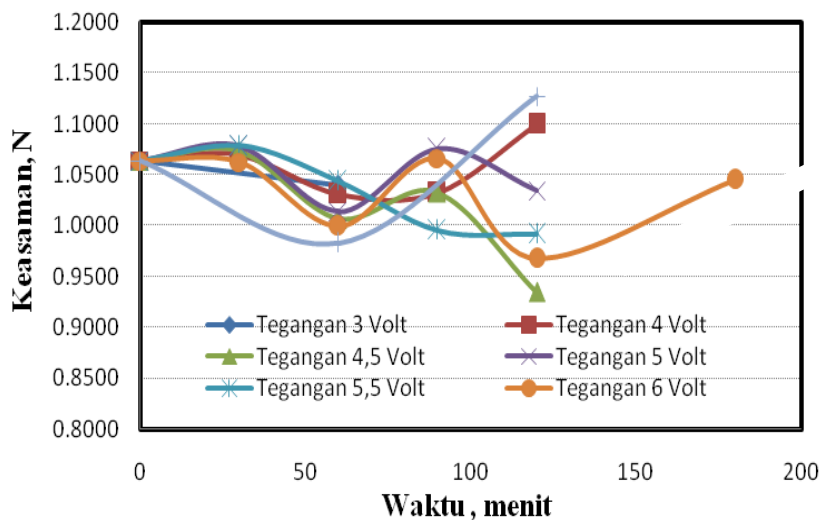


Gambar 5. Hubungan antara keasaman umpan terhadap tegangan dan waktu pada bilik anoda

Gambar 5 menunjukkan bahwa pada tegangan antara 3 hingga 7 Volt dengan berbagai parameter waktu 3 hingga 120 menit dan keasaman umpan sebesar 3,250-3,875 N artinya proses elektrodialisis dikondisikan pada *range* keasaman umpan tersebut. Apabila dalam proses pelaksanaan elektrodialisis terjadi kegagalan, maka kondisi keasaman umpan masih tetap memenuhi batasan ambang pada proses ekstraksi-*stripping*^[2].

Naik-turunnya keasaman umpan dapat terjadi dimungkinkan akibat ion-ion NO_3^- dari bilik anoda menerobos atau bermigrasi lewat membran (MTK) ke bilik katoda. Hal itu terjadi karena adanya arus aliran listrik pada berbagai tegangan (*Voltage*). Namun pada tegangan tertentu yaitu 6 Volt keasamannya yang diperoleh sebesar 0,9995 N seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil yang paling baik untuk proses elektrodialisis dan paling cocok/sesuai, sedangkan untuk grafik yang lain dapat dikatakan keasaman cenderung rendah/menurun dan terus menaik. Hal ini 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 6.



Gambar 6. Hubungan antara keasaman umpan terhadap tegangan dan waktu pada bilik katoda

Gambar 6 menunjukkan bahwa setelah proses elektrodialisis pemurnian $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 / \text{UO}_2^{+2}$ dimulai kadar asam dalam bilik katoda menaik-menurun, hal tersebut karena terjadi migrasi ion nitrat (NO_3^-) ditarik oleh katoda (elektroda Pt). Pada tegangan 3- 4,5, dan 5 Volt seiring dengan bertambah lamanya 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 dan analisis impuritas menurun seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. 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[25]
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	tak terdeteksi
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 keasaman yang terjadi pada bilik katoda dapat dirangkum Tabel 2. Parameter keasaman umpan uranil nitrat sebesar 3,254 N, konsentrasi U awal sebesar 0,5009 gU/L, waktu proses selama 60 menit, jarak elektroda ± 7 cm dan suhu proses 60°C.

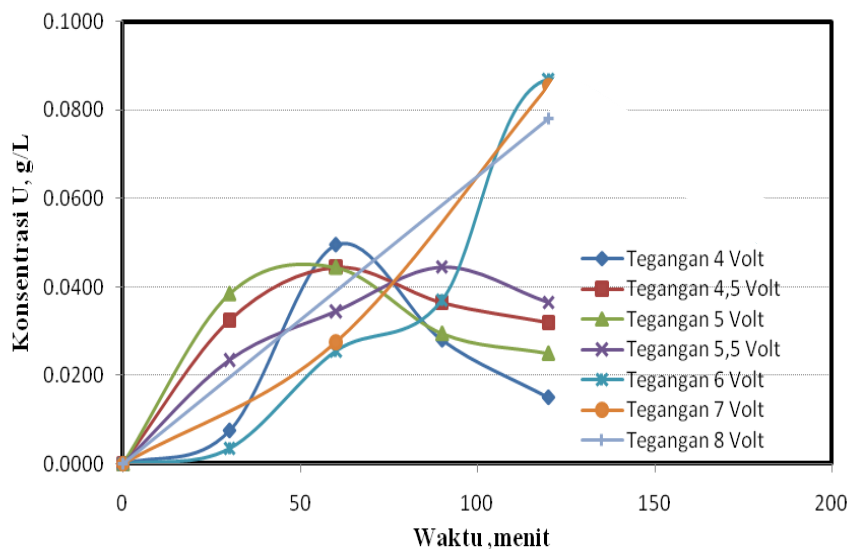
Tabel 2. Hasil proses elektrodialisis untuk pemurnian uranil nitrat

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

Tabel 2 menunjukkan pada keasaman 1,0400-1,0065 N dengan tegangan 3; 4; 4,5 Volt diperoleh kadar uranium masih rendah yaitu 9,301%. Namun setelah tegangan dinaikkan pada 5; 5,5; dan 6 Volt diperoleh kadar uranium semakin besar hingga 18,063% pada keasaman 0,9995 N dan kadar uranium pada kondisi yang paling memungkinkan karena di atas tegangan 6 Volt hasil yang diperoleh menurun.

Pengaruh tegangan dan pengaruh waktu proses elektrodialisis

Hasil analisis pemurnian umpam uranil nitrat dari hasil pelarutan *yellow cake* pada tegangan 4 hingga 7 Volt dan waktu proses dari 30 hingga 120 menit ditunjukkan pada Gambar 7, serta hasil analisis impuritas telah diperlihatkan dalam Tabel 1.

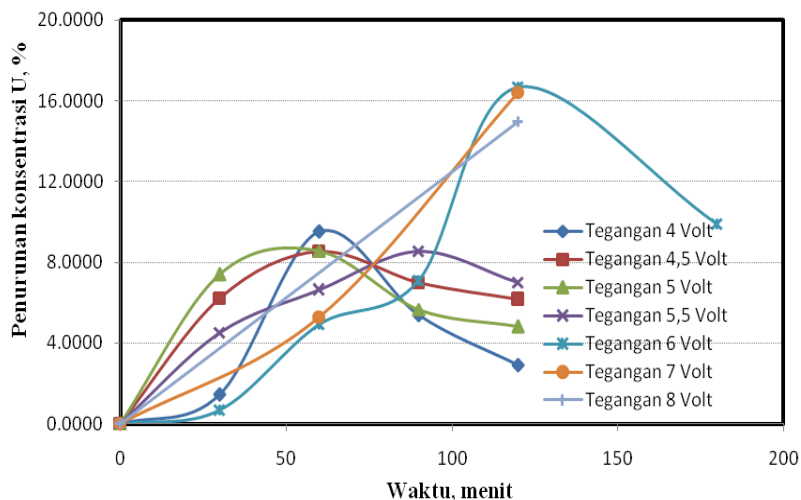


Gambar 7 Hubungan antara konsentrasi uranium terhadap tegangan dan waktu

Gambar 7 menunjukkan hasil kadar uranium dalam persen dan pada tegangan yang rendah pada 4; 4,5; 5; dan 5,5 Volt yang telah dituangkan pada Tabel 2. Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan kadar uranium pada bilik umpam (anoda) juga masih rendah. Setelah tegangan dinaikkan hingga 6 Volt, mulai terjadi penurunan kadar uranium dalam bilik umpam (bilik anoda) semakin besar yaitu sebesar 18,063%. Hal ini dapat dijelaskan bahwa penurunan kadar uranium dalam bilik umpam (bilik anoda) tersebut berarti akan menaikkan kadar uranium dalam bilik katoda. Hal ini menandakan bahwa telah terjadi perpindahan ion uranium yang bermuatan positif dari bilik umpam (bilik anoda) ke bilik katoda. Dengan demikian telah terjadi pemisahan uranium dari impuritasnya yang ditandai dengan penurunan konsentrasi uraniumnya, atau dengan perkataan lain, metoda elektrodialisis ini telah berhasil dan dapat digunakan untuk pemurnian uranium dari hasil pelarutan *yellow cake* atau dapat digunakan untuk memungut uranium dari limbah nuklir cair (efluen proses). Penurunan kadar uranium

dalam umpan terbesar terjadi pada tegangan 6 Volt, waktu 60 menit yaitu sebesar 18,063%, sedangkan konsentrasi uranium dalam ruang katoda 0,0745 gU/L.

Gambar 8 memperlihatkan penurunan kadar uranium (kadar uranium dalam persen) dalam bilik anoda (kenaikan kadar uranium dalam bilik katoda).



Gambar 8 Hubungan antara penurunan konsentrasi uranium terhadap tegangan dan waktu

Hasil pemurnian uranium yang diperoleh dari hasil pelarutan *yellow cake* pada proses elektrodialisis ini masih sangat rendah yaitu sebesar 18,063%. Hal itu dikarenakan dalam percobaan elektrodialisis yang dilakukan hanya dengan menggunakan 3 (tiga) parameter, kemungkinan dengan menambahkan parameter sesuai dengan yang disarankan pustaka ^[10-13,16-22], hasil pemurnian uranium yang diperoleh akan besar.

KESIMPULAN

Proses elektrodialisis dapat berlangsung karena telah terjadi perpindahan ion uranil dari bilik umpan ke bilik katoda melalui membran tukar kation (MTK). Perpindahan ini terjadi karena ion uranil (UO_2^{+2}) yang bermuatan positif ditarik oleh katoda negatif. Keasaman (normalitas asam nitrat dalam umpan) 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. Tegangan dan waktu elektrodialisis berpengaruh terhadap penurunan kadar uranium dalam umpan uranil 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 18,063%, atau konsentrasi U akhir dalam umpan 0,0745 g/L. Dari parameter yang digunakan dalam proses yaitu keasaman umpan, waktu,

dan tegangan diperoleh hasil uranium yang sudah murni artinya memenuhi untuk diumpangkan sebagai bahan bakar.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada 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.

DAFTAR PUSTAKA

1. Anwar Muchsin, Ghaib Widodo, "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, 2014.
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. Guntur Sodikin, "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, 2015.
5. Fathurrachman, A thesis, "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, 1995.
6. Fathurrachman, Fagi, "Elektrokimia dalam industri bahan bakar nuklir", Prosiding Seminar Nasional Elektrokimia, Pusat Penelitian dan Pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Bahan, ISBN 979-96559-0-0, Serpong, 2001.
7. Fathurrachman dan Wahyono, H., "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
8. E. E. Zaki and H. F. Aly, "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, 2000.

9. E. E. Zaki, "Electrodialysis of uranium(VI) through cation exchange membranes and modeling of electrodialysis processes", *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*; v. 252(1); ISSN 0236-5731; CODEN JRNCDM, 2002, pp. 21-30
10. Sigit, Ghaib Widodo, Ratih Langenati, Torowati, Noor Yudhi, "Pengaruh tegangan, waktu, dan keasaman pada proses elektrodialisis larutan uranyl nitrat", *J. Tek. Bhn. Nukl.*, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir-Batan, ISSN 1907-2635, 82/Akred-LIPI/P2MBI5/2007, Vol.6 No.1, 2010.
11. Ghaib Widodo, Rahmiati, "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/P2MBI/5/2007, Vol. 5 No. 2, 2009.
12. K.V. Protasov, S.A. Shkirskaya, N.P. Berezina, and V.I. Zabolotskii, "Composite sulfonated cation-exchange membranes modified with polyaniline and applied to salt solution concentration by electrodialysis", *Kuban State University, Krasnodar, Ruccsia*, Published in *Elektrokimiya* Vol. 46, No. 10, 2010, pp. 1209-1218
13. Laura J. Banasiak, Thomas W. Kruttschmitt, Andea I Schafer, "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*, 2007.
14. K. Kesore, F. Janowski, and V.A. Shaposhnik, "Highly effective electrodialysis for selective elimination of nitrates from drinking water", *Journal of Membrane Science*, 127(1), 1997, p 17-24.
15. M. Montaña^a, A. Camacho^a, I. Serrano^a, R. Devesa^b, L. Matia^b, I. Vallés^a, "Removal of radionuclides in drinking water by membrane treatment using ultrafiltration, reverse osmosis and electrodialysis reversal", *Journal of Environmental Radioactivity* Volume 125, 2013, Pages 86–92.
16. Zakrzewska-Trznadel, G., Harasimowicz, M., Chmielewski, A. G., "Membrane processes in nuclear technology-application for liquid radioactive waste treatment", *Sep. Purif. Technol.*, **22-23**: 2001, 617–625.
17. International Atomic Energy Agency, "Application of membrane technologies for liquid radioactive waste processing", *Technical reports series No. 431*, Vienna, Austria, 2004.
18. Ghaib Widodo, Hendro Wahyono, Ratih Langenati, dan Sigit, "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, 2010.
19. Wahyono, H., Widodo, G. dan Sunardi, "Penggunaan metoda elektrodialisis dalam pemisahan uranium dari efluen proses", Seminar Nasional SDM Teknologi Nuklir VII, ISSN 1978-0176, 2011.
 20. Zakrzewska-Trznadel, G., "Membrane processes for environmental protection: applications in nuclear technology". *Nukleonika*, (51), (Supplement 1), S101-S111, 2006.
 21. Mahendra, Ch.; Suranjan, B.; Anand Babu, C.; Rajan, K.K., "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), 2012.
 22. Valero, F., Tous, J.F. & Arbós, R., " Mejora de la calidad salnitaria del agua durante el primer año de explotación de la etapa de electro dialisis reversible (EDR) en la TAP del llobregat", Proceedings of the VII Congreso AEDYR, Barcelona, 2010.
 23. Ghaib Widodo, Nur Fitria Hanggari, "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, 2010.
 24. Ghaib Widodo, Bambang Herutomo, "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, 2010.
 25. Annual Book of ASTM Standards, "Section twelve, nuclear, solar, and geothermal energy", Volume 12.01 Nuclear energy (I), 2002.