

# PENENTUAN PARAMETER PROSES PEMISAHAN DAN ANALISIS Nd, Ce, Zr MENGGUNAKAN METODE KOLOM PENUKAR KATION

Noviarty, Erlina N, Rosika K  
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

## ABSTRAK

Penentuan Parameter Proses Pemisahan dan Analisis Nd, Ce, Zr Menggunakan Metode Kolom Penukar Kation, adalah kegiatan tahun pertama dari kegiatan komponen PEMBAKUAN METODE ANALISIS RADIONUKLIDA MONITOR BURN UP (Nd, Ce, Zr) DALAM PEB  $U_3Si_2/Al$  DAN PEB UMO/Al dengan tahun pencapaian 2019. Kegiatan penentuan parameter uji metode pemisahan dan analisis Nd, Ce dan Zr menggunakan metode kolom penukar kation yang telah dilakukan tahun 2017 meliputi kegiatan penentuan kinetika Pertukaran Kation, Penentuan Kapasitas Tukar Kation, Penentuan Koefisien distribusi dan Pemisahan Nd,Ce dan Zr dalam larutan campuran menggunakan kolom penukar kation dengan Eluen EDTA. Kegiatan ini bertujuan untuk mendapatkan parameter pemisahan unsure Nd,Ce dan Zr yang terdapat secara bersamaan dalam larutan hasil fisi. Keberadaan unsure Nd, Ce dan Zr secara bersamaan saling mempengaruhi dalam pengukuran secara uji merusak sehingga akan berpengaruh pada perhitungan Burn-up. Kegiatan ini dilakukan secara simulasi menggunakan larutan standar. Pada penentuan kinetika pertukaran kation untuk melihat waktu kontak diperoleh hasil penyerapan unsure Nd secara optimal terjadi dengan waktu kontak 5 menit, dan untuk unsure Ce pada waktu kontak 10 menit serta Zr pada waktu 1 menit. Pada penentuan KTK (kapasitas Tukar Kation) untuk melihat kebutuhan resin diperoleh nilai KTK rerata untuk unsure Nd yaitu 160,13 mg/g resin, untuk unsure Ce 156,96 mg/g resin, dan untuk unsure Zr 5,97 mg/g resin. Pada penentuan KD koefisien distribusi untuk melihat konsentrasi efluen yang dibutuhkan diperoleh hasil konsentrasi eluen untuk pemisahan Zr yaitu pada konsentrasi 0.005 ppm, sedangkan untuk pemisahan Nd dan Ce konsentrasi eluen EDTA yang dibutuhkan yaitu 0.01 ppm. Selanjutnya pada pemisahan dengan kolom penukar kation diperoleh hasil pemisahan Zr yang telah terpisah secara sempurna dari larutan campuran Nd dan Ce, sedangkan untuk pemisahan Nd dan Ce masih belum dapat dipisahkan secara optimal.

**Kata kunci** : pemisahan Nd, Ce dan Zr, eluen EDTA, KTK, KD

## PENDAHULUAN

Bidang Uji Radiometalurgi, instalasi ini dalam Peraturan Kepala BATAN Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional, mempunyai tugas untuk melaksanakan pengembangan radiometalurgi, analisis fisikokimia dan pemeriksaan material pasca iradiasi terhadap bahan bakar reaktor riset maupun bahan bakar reaktor daya beserta komponennya. Analisis *Post Irradiation Examination* (PIE) merupakan uji pasca iradiasi bahan bakar nuklir untuk penentuan *Burn-up*. Penentuan *Burn-up* perlu dilakukan selain untuk melihat unjuk kerja bahan bakar nuklir juga untuk menjamin kehandalannya selama proses iradiasi di reaktor. Pengujian untuk penentuan PIE antara lain adalah uji tidak merusak (*Non Destructive Test*, NDT) dan uji merusak (*Destructive Test*, DT).

Berbagai metoda telah dikembangkan untuk dapat menentukan *burn up* baik secara non destruktif (metoda gamma scanning ) maupun dengan cara destruktif. Ada beberapa

kriteria/pertimbangan yang diperlukan dalam memilih unsur-unsur hasil fisi agar bisa digunakan sebagai indikator *burn up* dengan cara non destruktif yaitu :

1. *High fission yield.*

Isotop hasil belah dengan *high fission yield* yang cukup tinggi diperlukan agar isotop tersebut tersedia dengan cukup di dalam bahan bakar sehingga mudah di deteksi.

2. Umur paruh panjang.

Isotop yang mempunyai umur paruh panjang diperlukan dalam hubungannya dengan konstanta peluruhan, sehingga walaupun dengan konstanta peluruhannya yang cukup lama aktivitas isotop yang diukur masih tidak berkurang secara signifikan, sedangkan isotop-isotop umur paruh pendek sudah habis meluruh, sehingga tidak mengganggu pengukuran.

3. Mempunyai energi (gamma) yang cukup tinggi.

Isotop hasil fisi dengan energi gamma yang cukup tinggi diperlukan agar mudah di deteksi oleh detektor. Selain itu, sinar gamma dengan energi semakin tinggi maka *self absorption* akan semakin kecil. Hal ini akan meminimumkan koreksi oleh bahan bakar dan *cladding* dan juga matrik elemen bakar nuklir.

4. *High gamma abundance*

Hal ini perlu untuk mendeteksi individual hasil fisi.

5. Mempunyai koefisien tampang lintang serapan neutron yang rendah.

Sifat isotop seperti ini diperlukan agar isotop yang diukur tidak hilang dari sejak awal reaksi fisi terjadi. Unsur yang mempunyai tampang lintang serapan neutron yang tinggi akan mudah bereaksi dengan neutron pada saat bahan bakar sedang di iradiasi/digunakan di reaktor, sehingga jumlahnya pada saat diukur tidak dapat menggambarkan jumlah hasil fisi yang terjadi selama irradiasi di reaktor.

6. Spektrum gamma yang puncaknya mudah dipisahkan

Sifat isotop hasil belah seperti ini diperlukan agar detektor gamma yang digunakan mampu memisahkan puncak-puncak energi yang berdekatan. Ini berkaitan erat dengan resolusi detektor yang digunakan.

Dari kriteria sifat-sifat isotop di atas maka dapat diidentifikasi sejumlah isotop hasil fisi yang dapat digunakan dalam penentuan *burn-up* secara non destruktif dari suatu bahan bakar nuklir seperti ditunjukkan pada Tabel 1<sup>[2]</sup>.

Tabel 1. Isotop hasil belah yang dapat digunakan sebagai indikator fisi <sup>[2]</sup>

No	Isotope	(Half life)	Energy (kev)	Abundance (%)	Fission yield (%)
1	Zr-95	65d	722	0,43	6,2
			756	0,54	
2	Nb-95	35d	762	1	6.2
3	Ba-140	12,8d	30	0,09	6,32
			304	0,08	
			537	0,25	
4	La-40	40d	129	0,19	6,44
			328	0,16	
			487	0,38	
			815	0,36	
			926	0,12	
			1596	0,94	
			2500	0,05	
5	Ru-106	1,01yr	513	0.25	0,38
			Rh-106	30s	
			870	0,01	
			1045	0,012	
			1550	0.005	
			2410	0,0025	
			2900	0,02	
6	Ce-144	258d	54	0,025	6,0
			80	0,236	
			95	0,055	
			134	0,102	
7	Ba-137m	2,6m	661,6	0,82	6,15
8	Pr-144	17,5m	695	0,049	6,0
			1490	0,009	
			2145	0,008	
9	Cs-137	30,17yr	661.7		6,15

Dengan memilih isotop hasil fisi dari Tabel 1 diharapkan akan diperoleh indikator pengukuran dan perhitungan *burn up* yang cukup akurat. Penentuan *burn up* dengan

metode destruktif dilakukan berdasarkan pada hasil analisis kimia dari suatu isotop yang telah dipisahkan dari isotop-isotop berat hasil fisi. Berdasarkan komposisi isotop yang terdapat dalam Tabel 1 dan 2 isotop Nd, Ce dan Zr dapat digunakan untuk monitor *burn up* menggunakan peralatan Mass Spektrometer<sup>[3]</sup>. Berdasarkan metode ASTM E 321-69 untuk menganalisis isotop Nd, diperlukan pemisahan Nd dari Ce karena isotop <sup>144</sup>Nd dan <sup>144</sup>Ce mempunyai nomor massa yang sama, sehingga mengganggu pengukuran. Sehubungan dengan hal tersebut maka perlu dilakukan pembakuan metode untuk analisis radionuklida Nd,Ce dan Zr karena keberadaannya secara bersamaan sebagai produk fisi dalam bahan bakar<sup>[4]</sup>.

Table 2. Isotopic Compositions of Certified Spikes from ORNL<sup>[3]</sup>

spike	Isotope	Atom %
U-233	U-233	99.470
	U-234	0.166
	U-235	0.064
	U-236	0.015
	U-238	0.282
Pu-242	Pu-238	0.0009
	Pu-239	0.0826
	Pu-240	0.0108
	Pu-241	0.0009
	Pu-242	99.9033
Nd-150	Pu-244	0.0015
	Nd-142	0.77
	Nd-143	0.39
	Nd-144	0.88
	Nd-145	0.34
	Nd-146	0.84
	Nd-148	0.66
Nd-150	96.13	

Dalam usaha mendapatkan metode yang valid, dilakukan simulasi pemisahan Ce, Nd dan Zr dalam bahan bakar PEB UMo/Al dan PEB U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>/Al menggunakan standar dari spex. Pemisahan unsur Nd, Ce dan Zr dapat dilakukan menggunakan metoda kolom penukar kation dengan Resin Dowex 50 W X8<sup>[5]</sup>. Sebelum pemisahan Nd, Ce dan Zr dilakukan, terlebih dahulu dilakukan pengujian parameter pemisahan meliputi :

1. Penentuan Kinetika Pertukaran Kation
2. Penentuan Kapasitas Tukar Kation
3. Penentuan Koefisien distribusi

#### 4. Pemisahan unsur Nd, Ce dan Zr dalam larutan campuran menggunakan metoda kolom penukar kation

Penentuan Kinetika Pertukaran Kation dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui waktu kontak/waktu tinggal yang optimal agar terjadi penyerapan unsure secara maksimal<sup>[6]</sup>

Penentuan Kapasitas Tukar Kation (KTK) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui Jumlah umpan dan berat resin yang optimal agar terjadi pertukaran kation secara maksimal. Penentuan kapasitas tukar kation digambarkan dalam besaran nilai KTK, yang diperoleh dari di hitung berdasarkan meg unsure yang dipertukarkan dibandingkan dengan jumlah resin<sup>[6,7]</sup>.

Penentuan koefisien distribusi (KD) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui Jumlah/konsentrasi efluen yang optimal untuk mengelusi/ melepaskan kembali unsur yang telah terikat pada resin. Selanjutnya dilakukan pemisahan campuran unsur Nd,Ce dan Zr menggunakan metoda kolom penukar kation, Parameter parameter yang telah diperoleh secara simulasi menggunakan sampel standar selanjutnya akan diterapkan dalam sampel uji PEB  $U_3Si_2/Al$  dan  $UMo/Al$ <sup>[3]</sup>.

## METODOLOGI

Pada kegiatan penelitian ini bahan-bahan yang digunakan yaitu : larutan standar Ce, Nd, Zr dari spex, resin Dowex 50W-X8, HCl larutan EDTA, kertas saring, dan akuades. Peralatan yang digunakan adalah XRF, spektrofotometer UV-Vis, *shaker*, *centrifuge*, neraca analitik, lampu infra red, pipet eppendorf, peralatan gelas dan vial polyethylene.

### Tata Kerja :

#### Aktivasi Resin

Aktivasi resin dilakukan dengan cara perendaman resin selama 1 (satu) malam dalam akuades. Hal ini menyebabkan resin mengembang atau *swelling* karena struktur molekuler resin menjadi terbuka dan permeabel sehingga ion dan molekul pelarut dapat bergerak keluar masuk dengan bebas. Selanjutnya resin dicuci dengan HCl 1 M untuk memastikan seluruh gugus resin terikat dengan ion  $H^+$  dan sekaligus untuk menghilangkan logam pengotor. Kemudian resin dicuci dengan akuades untuk menghilangkan kelebihan HCl. Resin selanjutnya dikeringkan pada suhu  $35^{\circ}C$  selama 2 (dua) hari. Perkiraan jumlah resin yang dibutuhkan untuk pemisahan diketahui dari nilai kapasitas resin tersebut.

### **Penentuan Kinetika Pertukaran Kation dan Kapasitas Tukar Kation**

Kinetika pertukaran dan kapasitas tukar kation dilakukan dengan cara melarutkan masing-masing 0,5 gr resin yang telah diaktivasi kedalam masing-masing 30 ml larutan Nd,Ce dan Zr. 1000 ppm. Selanjutnya dilakukan pengambilan 250  $\mu$ L larutan setelah 5 menit hingga 2 jam pengocokan. Larutan yang diambil (Refinat)dianalisis menggunakan spektrometer UV-Vis. Dari hasil analisis dihitung meg unsur yang dapat dipertukarkan dengan jumlah resin.

### **Penentuan Koefisien Distribusi (KD)**

Dilakukan dengan menimbang 0,25 gr resin yang telah diaktivasi kemudian ditambahkan masing-masing kedalam 5 mL larutan Nd,Ce dan Zr 1000 ppm, Selanjutnya larutan di kocok dan dipisahkan dari resin. Resin yang telah dipisahkan dikeringkan pada suhu 35 °C, kemudian ditambahkan larutan EDTA sebanyak 5 mL dengan konsentrasi bervariasi dari 0,005 M hingga 0,100 M. Selanjutnya dianalisis menggunakan XRF

### **Pemisahan Nd, Ce dan Zr Dengan Kolom**

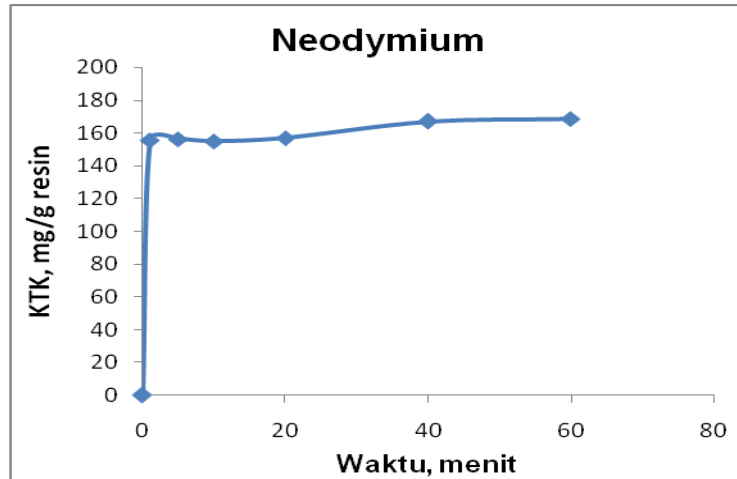
Dilakukan dengan membuat larutan umpan dari campuran larutan standar unsur Nd,Ce dan Zr masing-masing 1000 ppm. Larutan umpan dimasukan kedalam kolom penukar kation yang telah berisi resin 0,5 gram resin. Selanjutnya dilakukan proses elusi menggunakan larutan EDTA dengan konsentrasi bervariasi 0.005, 0,1 dan 0,015 ppm. Hasil elusi ditampung setiap 5 ml untuk kemudian diukur dengan spektrometer XRF.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada kegiatan aktivasi resin yang telah dilakukan, diperoleh nilai kapasitas resin yang dapat dipertukarkan yaitu sebesar 4,26 mgek/g. Nilai kapasitas resin yang diperoleh digunakan untuk menghitung jumlah resin yang dibutuhkan dalam proses pemisahan. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa 1 gram berat Resin Dowex 50W-X8 di-perkirakan dapat menyerap sekitar 204,64 mg Nd atau 149,1 mg Ce, atau 97,15 mg Zr.

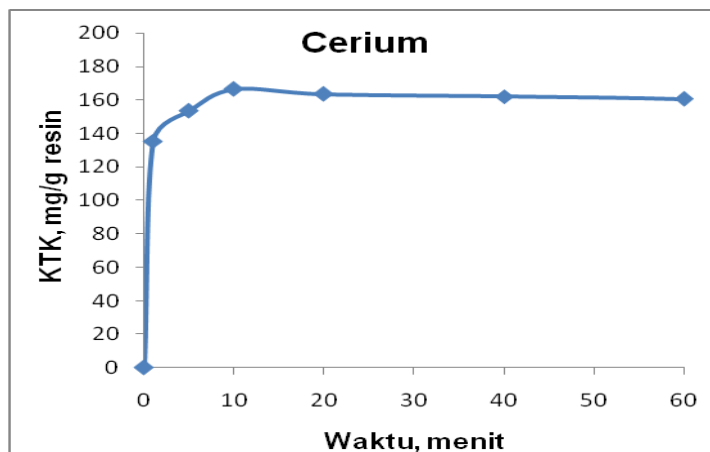
### **Penentuan Kinetika Pertukaran Kation**

Hasil kegiatan penentuan kinetika pertukaran Kation yg dilakukan dengan menambahkan masing-masing 0,5 gr resin kedalam masing-masing 30 ml larutan Nd, Ce dan Zr. 1000ppm ditunjukkan dalam Gambar 1-3, Pada Gambar tersebut terlihat bahwa unsur Nd dan Ce dapat diserap dengan baik oleh resin dan penyerapan unsur Nd secara optimal telah terjadi pada waktu kontak 5 menit.



Gambar 1. Kinetika Pertukaran Kation Nd

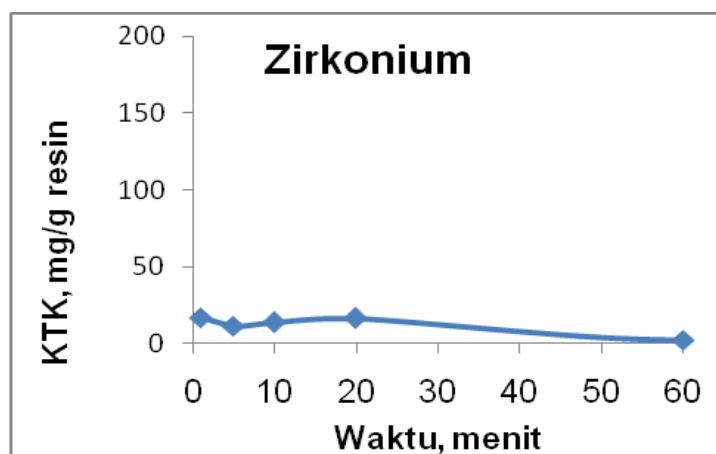
Penyerapan optimum unsur Ce terjadi pada waktu kontak 10 menit, sedangkan pada unsur Zr terjadi pada waktu kontak 1 menit. Pada Gambar 1 dan Gambar 2 terlihat bahwa penambahan waktu kontak hingga 60 menit tidak memberikan perubahan yang signifikan terhadap proses penyerapan Nd dan Ce.



Gambar 2. Kinetika Pertukaran Kation Ce

Sedangkan Pada Gambar 3 terlihat untuk unsur Zr dengan waktu kontak yang lebih lama Zr akan terlepas kembali. Pelepasan Zr kembali menunjukkan bahwa Zr tidak dapat diserap oleh resin. Pada Gambar 1 dan Gambar 2 juga terlihat untuk unsur Nd dan Ce terdapat perbedaan waktu serap karena nilai KTK yang berbeda. Dengan demikian pada sampel yang mengandung campuran Nd, dan Ce akan terjadi pertukaran kation terlebih dahulu pada unsur Nd dan jika kation atau resin yang dipertukarkan telah terisi semua oleh unsur Nd maka kation Ce akan diserap oleh resin berikutnya. Dengan demikian maka

perbedaan waktu kontak antara Nd dan Ce ini dapat dipakai sebagai dasar untuk memisahkan antara Nd dan Ce.



Gambar 3. Kinetika Pertukaran Kation Zr

### Penentuan Kapasitas Tukar Kation (KTK)

Kegiatan kapasitas tukar kation yang digambarkan dalam besaran nilai KTK, diperoleh dari jumlah meligram ekivalen unsur yang dipertukarkan dibandingkan dengan jumlah 1 gram resin (mg/g). Penentuan nilai KTK dilakukan terhadap masing-masing unsur Nd, Ce dan Zr dengan menggunakan metoda batch. Hasil penentuan nilai KTK yang diperoleh dari unsur Nd, Ce dan Zr ditunjukkan dalam Tabel 3:

Tabel 3 Data hasil pengukuran KTK unsur Nd, Ce dan Zr

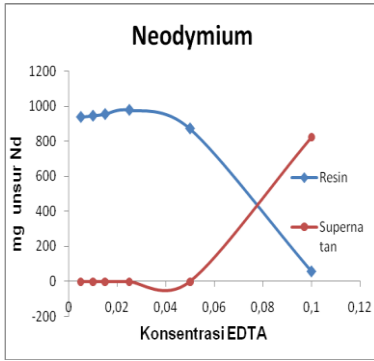
Nama unsur	KTK Terukur rerata (mg/g resin)
Niodenium (Nd)	160,13
Cesrium (Ce)	156,96
Zirkonium (Zr)	5,97

Pada Tabel 3 diperoleh nilai KTK rerata untuk unsur Nd yaitu 160,13 mg/g resin, untuk unsur Ce 156,96 mg/g resin, dan untuk unsur Zr 5,97 mg/g resin. Nilai KTK unsur Nd dan Ce lebih besar dibandingkan nilai KTK dari unsur Hal ini disebabkan .karena energi ionisasi unsur Zr yang terdapat dalam sistem priodik golongan IVB lebih besar dibandingkan energi ionisasi unsur Nd dan Ce yang terdapat di golongan IIIB unsure lantanida sehingga kemampuan unsure Zr untuk menangkap electron ( $e^-$ ) lebih lemah<sup>[8:9]</sup> Sifat ini dapat digunakan untuk pemisahan Zr dari unsur Nd dan Ce menggunakan resin penukar ion.

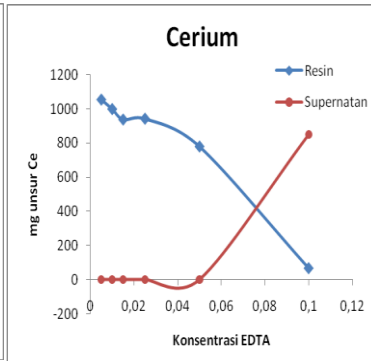


**Penentuan koefisien distribusi (KD)**

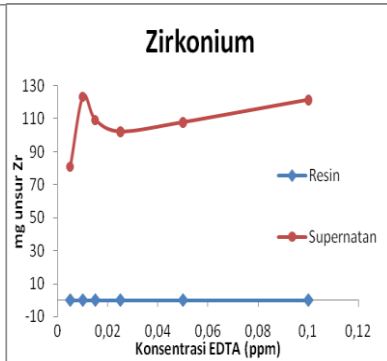
Penentuan koefisien disribusi (KD) dilakukan untuk mengetahui Jumlah/konsentrasi efluen yang optimal untuk mengelusi/ melepaskan kembali unsur yang telah terikat pada resin. Penentuan KD dilakukan terhadap masing-masing unsur Nd,Ce dan Zr dengan memvariasi konsentrasi larutan EDTA sebagai larutan pengelusi dari konsentrasi 0,005; 0,01; 0,015; 0,025; 0,05; 0,1 M. Hasil penentuan KD tersebut ditunjukkan dalam Gambar 4 s.d 6 berikut;



Gambar 4. Profil serapan Nd

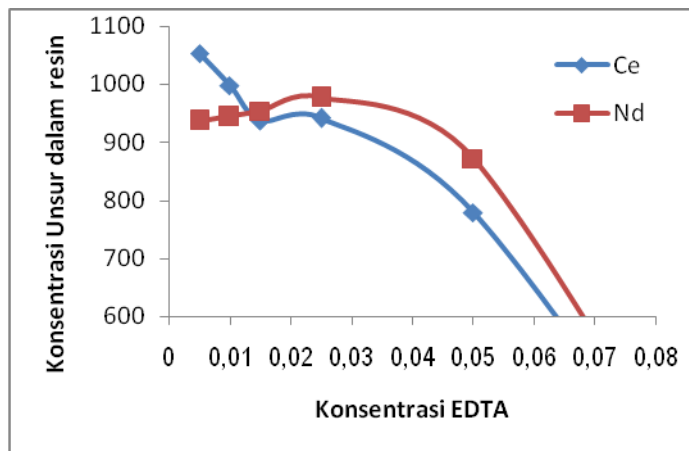


Gambar 5. Profil serapan Ce



Gambar 6. Profil serapan Zr

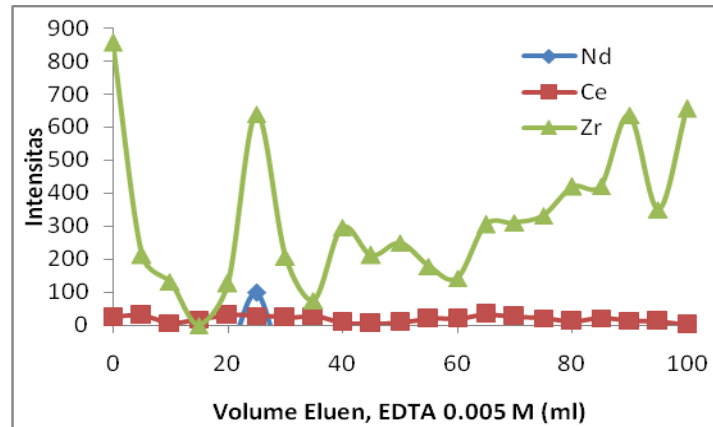
Hasil penentuan KD yang ditunjukkan dalam Gambar 4-6 terlihat bahwa untuk unsur Zr sudah tidak ada lagi dalam resin, hal ini menunjukkan bahwa unsur Zr akan langsung terlepas ketika dielusi, sedangkan untuk unsur Nd dan Ce masih terikat dalam resin. Namun pada konsentrasi pengelusi EDTA 0,01 ppm terlihat bahwa unsur Nd dapat terelusi oleh EDTA, sedangkan Unsur Ce masih terikat dalam resin hal ini dapat kita lihat dalam Gambar 7. Profil yang ditunjukkan dalam Gambar 7 tersebut dapat digunakan sebagai acuan untuk pemisahan unsur Nd dan Ce menggunakan metode kolom



Gambar 7. Profil serapan Unsur Nd dan Ce

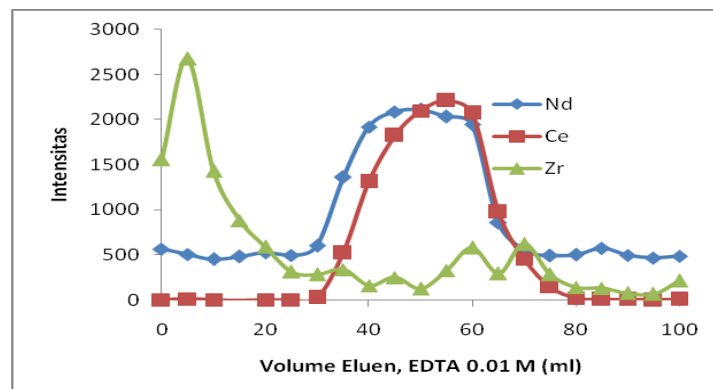
### Pemisahan Nd, Ce dan Zr Dengan Kolom

Pemisahan unsur Nd,Ce dan Zr dalam suatu larutan campuran dilakukan dengan metode kolom penukar kation menggunakan resin dowex 50 dengan pengelusi larutan EDTA konsentrasi 0,005 ; 0,01 dan 0,015 ppm EDTA. Dari proses pemisahan menggunakan pengelusi EDTA konsentrasi 0,005 ppm diperoleh hasil seperti ditunjukkan dalam Gambar 8 bahwa unsur Zr, dapat terelusi dengan baik sehingga terpisah dari unsur Nd dan Ce yang masih terikat dengan dalam resin.



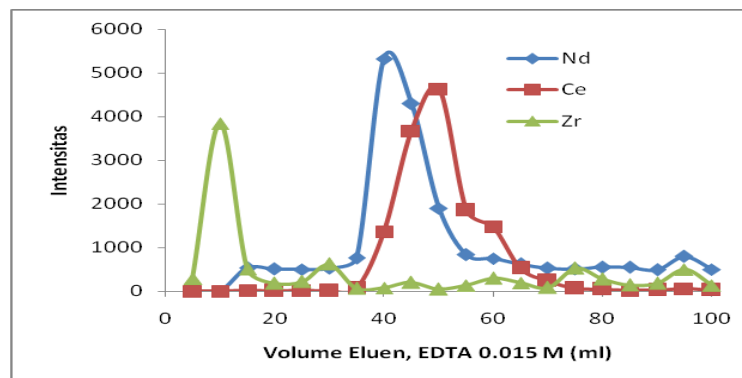
Gambar 8. Pemisahan Unsur Nd, Ce dan Zr dengan EDTA 0,005 M

Selanjutnya elusi dilakukan menggunakan EDTA 0,01 ppm, dari proses pemisahan diperoleh hasil seperti ditunjukkan dalam Gambar 9, dimana unsur yang hanya dapat terpisah dengan baik adalah unsur Zr karena pada eluen dalam jumlah 25 ml unsur Zr telah terpisah secara sempurna dari unsur Nd dan Ce, sedangkan unsur Nd dan Ce baru terelusi berbarengan pada volume eluen 30, sehingga penggunaan eluen EDTA pada konsentrasi 0,01 juga tidak dapat digunakan untuk pemisahan unsur Nd dan Ce.



Gambar 9. Pemisahan Unsur Nd, Ce dan Zr dengan EDTA 0,01 M

Pemisahan dilanjutkan dengan menggunakan eluen konsentrasi 0,015. Dari proses pemisahan tersebut diperoleh hasil seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Pada Gambar 10 terlihat bahwa proses pemisahan unsur Nd dan Ce juga belum menunjukkan hasil yang signifikan karena unsur Nd dan Ce belum terpisah secara baik, karena unsur Nd dan Ce masih sama terelusi. Sehingga untuk pemisahan unsur Nd dan Ce harus dikaji ulang dengan menggunakan eluen lain.



Gambar 10. Pemisahan Unsur Nd, Ce dan Zr dengan EDTA 0,015 M

## KESIMPULAN

Pada kegiatan tentang penentuan parameter uji metode pemisahan dan analisis Nd, Cd, Zr menggunakan metode kolom penukar kation yang meliputi kegiatan penentuan kinetika Pertukaran Kation, Penentuan Kapasitas Tukar Kation, Penentuan Koefisien distribusi dan Pemisahan Nd,Ce dan Zr dalam larutan campuran menggunakan kolom penukar kation dengan Eluen EDTA dapat disimpulkan:

1. Waktu kontak penyerapan unsure Nd secara optimal terjadi dengan waktu kontak 5 menit, dan untuk unsur Ce pada waktu kontak 10 menit serta Zr pada waktu 1 menit.
2. Nilai KTK rerata untuk unsure Nd yaitu 160,13 mg/g resin, untuk unsure Ce 156,96 mg/g resin, dan untuk unsure Zr 5,97 mg/g resin.
3. Konsentrasi efluen yang dibutuhkan untuk pemisahan Zr yaitu pada konsentrasi 0,005 ppm, sedangkan untuk pemisahan Nd dan Ce konsentrasi eluen EDTA yang dibutuhkan yaitu 0,01 ppm.
4. Pemisahan Nd,Ce dan Zr dalam larutan campuran dengan kolom penukar kation diperoleh hasil pemisahan Zr telah terpisah secara sempurna dari larutan campuran Nd dan Ce, sedangkan untuk pemisahan Nd dan Ce masih belum dapat dipisahkan secara optimal, sehingga metoda ini perlu untuk dikaji ulang kembali.

## UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih banyak kami sampaikan kepada Ir. Sungkono M.T, selaku kepala BUR yang telah mendanai kegiatan ini melalui kegiatan DIPA 2017, Ir. Aslina Br Ginting selaku penanggungjawab sub output, teman operator peralatan (Iis Haryati, S.Fatimah dan Sutri Indaryati) yang ikut membantu terlaksananya kegiatan ini.

## PUSTAKA

1. BATAN, Peraturan Kepala Batan Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional.
2. Purba A, "Penentuan Distribusi *Burn Up* Elemen Bakar Nuklir Reaktor Daya Dengan Metoda *Gamma Scanning* Secara Diskrit " Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III, Pusat Pengembangan Energi Nuklir Badan Tenaga Nuklir Nasional, 2010
3. Jung Suk KIM et al. "Burnup Determination of High Burnup and Dry Processed Fuels Based on Isotope Dilution Mass Spectrometric Measurements" *Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY*, Vol. 44, No. 7, p. 1015–1023 (2007
4. ASTM E 321-69 Standard Test Method for Atom Percent Fission in Uranium and Plutonium Fuel (Neodymium-148 Method)
5. Dwi Biyantoro, Kris Tri Basuki, Muhadi AW. "Pemisahan Ce dan Nd Menggunakan Resin DOWEX 50W-X8 Melalui Proses Pertukaran Ion" ISSN 1410-695, Ganendra, Vol. IX, No. 1, Januari 2006
6. Dian Anggraini, Noviaty, Arif Nugroho, "Kinetika Dan Difusi Penukaran Ion Cs Ke Dalam Zeolit Bayah, Lampung Dan Tasikmalaya" *Journal of Indonesia Zeolites* ISSN : 1411-6723 Vol 9 No. 2 November 2010
7. Pepi Helza Yanti, dkk "Analisis Kapasitas Tukar Kation Birnessite" diunduh pada tanggal 2 April 2018 dari :  
<https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/chemprog/article/viewFile/4847/4372>
8. ANONIM, Tabel Periodik diunduh pada tanggal 18 Juli 2018 dari :  
[https://id.wikipedia.org/wiki/Tabel\\_periodik](https://id.wikipedia.org/wiki/Tabel_periodik)
9. Rahmi, "Sifat Sistem Periodik" diunduh pada tanggal 2 April 2018 dari :  
<https://rahmikimia.wordpress.com/kimia-kelas-x/2-sistem-periodik-unsur/c-sifat-sistem-periodik/>.