

## Kajian Keberkesanan Pengekstrakan Torium daripada Larutan Asid Hidroklorik menggunakan Di(2-Etilheksil) Asid Fosforik ( $D_2EHPA$ ) (Effectiveness Study of Thorium Extraction from Hydrochloric Acid using Di (2-Ethylhexyl) Phosphoric Acid ( $D_2EHPA$ ))

AHMAD HAYATON JAMELY MOHD SALEHUDDIN, ELI SYAFIQAH AZIMAN, CHE NOR ANIZA CHE ZAINUL BAHRI, MUHAMMAD AMIRUL RAFIQ AHMAD AFFENDI, WAN MOHD RAZI IDRIS & AZNAN FAZLI ISMAIL\*

### ABSTRAK

Pengekstrakan torium daripada larutan akueus torium tetraklorida ( $ThCl_4$ ) telah dilakukan dengan menggunakan larutan organik Di-(2-etikheksil) asid fosforik dalam kerosen ( $D_2EHPA/K$ ). Objektif kajian ini adalah untuk menentukan parameter kepekatan organik dalam pelarut dan masa campuran optimum yang mempengaruhi kecekapan pengekstrakan. Campuran torium - nadir bumi hidroksida ( $[Th-RE](OH)_4$ ) daripada sumber kepekatan monazit tempatan dilarutkan dalam asid hidroklorik ( $HCl$ ) pada kepekatan 3 dan 4 molariti. Larutan akueus  $[Th-RE](OH)_4$  ini dicampurkan dengan pelarut organik  $D_2EHPA/K$  pada kepekatan berbeza iaitu 10%, 20% dan 30%. Sebatian diaduk selama 5 hingga 20 min sebelum fasa larutan akueus dan organik dipisahkan. Kepekatan torium sebelum dan selepas pengekstrakan dianalisis menggunakan Spektrometri Jisim Plasma Gandingan Teraruh (ICP-MS). Keputusan kajian mendapati peningkatan kepekatan torium dalam larutan akueus ( $Th-RE$ ) $OH_4$  dalam julat  $119.40 \pm 3.43 - 121.13 \pm 3.18$  ppm berbanding sebelumnya. Kecekapan pengekstrakan optimum bagi torium ialah 99.8%, menggunakan  $D_2EHPA/K$  pada kepekatan 30%. Keputusan kajian juga mendapati masa optimum bagi proses campuran dan pemisahan torium dalam larutan akueus kepada fasa organik masing - masing adalah 5 min. Sehubungan dengan itu, kajian ini membuktikan  $D_2EHPA$  berpotensi untuk digunakan sebagai agen pengekstrakan torium daripada larutan asid hidroklorik.

Kata kunci:  $D_2EHPA$ ; kerosen; monazit; pengekstrakan torium

### ABSTRACT

Thorium extraction from thorium tetrachloride aqueous solution ( $ThCl_4$ ) was performed by using organic solution of Di-(2-ethylhexyl) phosphoric acid in kerosene ( $D_2EHPA/K$ ). The study aims to determine the organic concentration parameter in the solvent and the mixing time that influences the extraction efficiency. Mix thorium-rare earth hydroxide ( $Th-RE$ ) $(OH)_4$  from local monazite concentrates was dissolved in 3 M and 4 M of hydrochloric acid, respectively. The aqueous solution of ( $Th-RE$ ) $(OH)_4$  was mixed with the organic solvent  $D_2EHPA/K$  at different concentrations of 10%, 20%, and 30%, respectively. The mixture was stirred for 5 to 20 min before the aqueous and organic phase were separated. Thorium concentrations before and after extraction were analysed using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS). The result indicates that thorium concentrate in aqueous solution ( $Th-RE$ ) $OH_4$  is in a range of  $119.40 \pm 3.43 - 121.13 \pm 3.18$  ppm. The highest extraction efficiency for thorium was 99.8%, extracted using  $D_2EHPA/K$  at 30% of concentration. The result indicated that the optimum mixing and separation times of thorium from aqueous solution into organic phase was 5 min, respectively. Therefore, this research proves that  $D_2EHPA$  is potentially be used as thorium extraction agent digested in hydrochloric acid.

Keywords:  $D_2EHPA$ ; kerosene; monazite; thorium extraction

### PENGENALAN

Torium wujud secara semula jadi dalam alam sekitar dengan kelimpahan empat kali ganda berbanding uranium. Penggunaan torium sebagai bahan api nuklear mula diberi perhatian disebabkan bekalan sumber uranium yang semakin berkurangan. Kajian sebelumnya melaporkan bekalan sumber uranium mampu bertahan sekitar 80 hingga 250 tahun bergantung kepada kadar penggunaan semasa (Aznan & Yim 2015).

Sumber utama torium dunia adalah daripada mineral monazit dengan kepekatan purata sebanyak 9 - 10%  $ThO_2$

(USGS 2017). Pengekstrakan torium daripada monazit boleh dilakukan melalui tiga peringkat iaitu penghadaman, pemisahan dan penulenan (Abreu & Morais 2014). Kaedah penghadaman yang biasa digunakan ialah dengan menggunakan larutan asid sulfurik ataupun alkali pekat seperti natrium hidroksida (NaOH) (Bahri et al. 2016). Teknik pemisahan torium daripada unsur nadir bumi (REE) amnya dilakukan melalui kaedah pemendakan terpilih. Agen pemendakan yang lazim digunakan ialah NaOH, ammonium hidroksida ( $NH_4OH$ ) dan hidrogen peroksida ( $H_2O_2$ ) (Joo et al. 2012; Kumari et al. 2015).

Penulenan torium yang telah diekstrak dilakukan menggunakan kaedah pertukaran ion, pengekstrakan pelarut dan agen pemendakan (Sadri et al. 2017). Antara ketiga-tiga kaedah penulenan ini, teknik pengekstrakan pelarut merupakan teknik yang terbaik untuk mendapatkan torium berketulenan tinggi. Kelebihan teknik ini adalah berdasarkan faktor pengekstrakan yang mudah dan menghasilkan sisa sampingan yang sedikit selain kos pengekstrakan yang rendah (Al-Areqi et al. 2017). Ketulenan torium bergantung kepada kebolehlarutan torium dalam larutan akueus dan organik dengan membentuk ion kompleks. Pelarut yang lazim digunakan untuk pengekstrakan torium adalah seperti tri-butyl fosfat (TBP), Aliquat-316, Alamin-336 (Amaral & Morais 2010; Nasab et al. 2011). Dalam kalangan pelarut-pelarut ini, pelarut TBP telah digunakan secara komersial dalam industri pengekstrakan torium. Namun begitu, kelemahan utama penggunaan TBP adalah disebabkan keperluan penggunaan bahan kimia dalam kuantiti yang banyak selain melibatkan pengekstrakan berperingkat bagi mendapatkan torium berketulenan tinggi (Nasab et al. 2011). Selain itu, bahan pelarut TBP merupakan bahan terkawal dan sukar untuk diperolehi (Albraight et al. 2009). Oleh itu, penggunaan pelarut alternatif untuk mengekstrak torium perlu dikaji.

Pelarut D<sub>2</sub>EHPA telah terbukti berkesan untuk mengekstrak uranium (U), zink (Zn) dan unsur nadir bumi lain (REE) (Abreu & Morais 2014; Kumar et al. 2011; Xie et al. 2014). Oleh yang demikian, tumpuan kajian ini untuk menganalisis kecekapan pengekstrakan torium menggunakan pelarut D<sub>2</sub>EHPA. Kepekatan optimum pelarut D<sub>2</sub>EHPA dalam kerosen (D<sub>2</sub>EHPA/K) untuk mengekstrak torium pada molariti yang berbeza telah dikaji. Selain itu, masa optimum bagi proses pencampuran dan pemisahan torium daripada larutan akueus kepada fasa organik telah ditentukan dalam kajian ini.

## BAHAN DAN KAEDAH

### BAHAN KIMIA DAN REAGEN

Bahan kimia dan reagen yang digunakan dalam kajian ini ialah serbuk torium - nadir bumi hidroksida ((Th-RE)OH<sub>4</sub>), 37% asid hidroklorik (HCl), Di-(2-etilheksil) asid fosforik (D<sub>2</sub>EHPA) dan kerosen. Serbuk (Th-RE)OH<sub>4</sub> diperolehi daripada kepekatan monazit tempatan, manakala HCl dibekalkan oleh ACL LabScan. Selain itu, kedua-dua pelarut organik D<sub>2</sub>EHPA dan kerosen dibekalkan oleh R&M Chemical.

### PENYEDIAAN LARUTAN AKUEUS Th-RE TETRAKLORIDA (Th-RE)Cl<sub>4</sub>

Serbuk (Th-RE)OH<sub>4</sub> telah dihasilkan melalui proses pemendakan terpilih daripada larutan larut lesap konsentrat monazit menggunakan ammonium hidroksida (NH<sub>4</sub>OH) pada pH2.2. Seterusnya larutan akueus (Th-RE)Cl<sub>4</sub> disediakan dengan melarutkan 0.1 g (Th-RE)OH<sub>4</sub> masing-

masing ke dalam 3M dan 4M HCl. Kepekatan unsur dalam larutan akueus (Th-RE)Cl<sub>4</sub> telah ditentukan menggunakan Spektrometri Jisim Plasma Gandingan Teraruh (ICP-MS) model ELAN 9000 (PerkinElmer SCIEX).

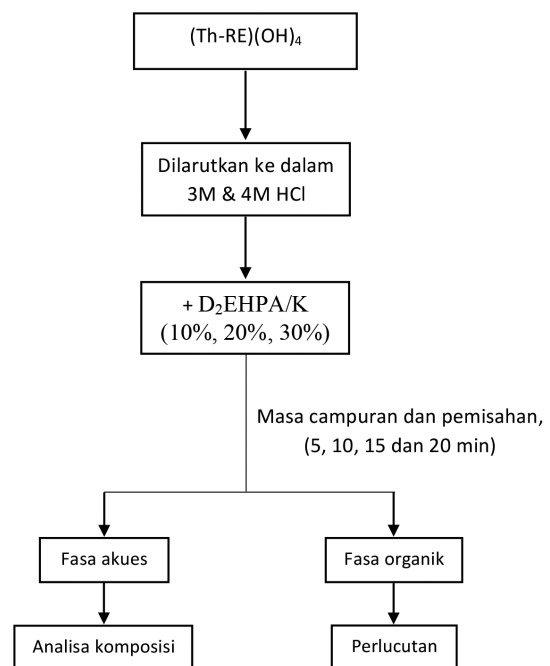
### PENGEKSTRAKAN TORIUM MENGGUNAKAN D<sub>2</sub>EHPA DALAM KEROSEN (D<sub>2</sub>EHPA/K)

Pelarut organik disediakan dengan melarutkan 10%, 20% dan 30% D<sub>2</sub>EHPA dalam kerosen. Larutan akueus (Th-RE)Cl<sub>4</sub> dicampurkan dengan organik D<sub>2</sub>EHPA/K pada nisbah 1:1 (v/v) dan diaduk menggunakan pengaduk magnetik (Cimarex) dengan kelajuan 600 rpm selama 5-20 min pada suhu bilik (25°C). Kemudian, campuran dimasukkan ke dalam corong pemisah dan dibiarkan selama 5-20 min bagi mencapai fasa keseimbangan. Seterusnya fasa organik dan akueus dipisahkan. Analisis ICP-MS dilakukan ke atas fasa akueus bagi menentukan kepekatan unsur. Persamaan (1) menunjukkan rumus bagi pekali taburan (D), manakala peratus kecekapan pengekstrakan dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$D = \frac{C_o - C}{C} \quad (1)$$

$$E\% = \frac{DV_o}{DV_o + V_{aq}} \times 100 \quad (2)$$

dengan D ialah pekali taburan; C<sub>o</sub> dan C masing-masing ialah kepekatan unsur sebelum dan selepas pengekstrakan; V<sub>aq</sub> dan V<sub>o</sub> masing-masing ialah isi padu larutan akueus dan organik (Al-Areqi et al. 2017). Rajah 1 menunjukkan carta



RAJAH 1. Carta alir proses pengekstrakan torium dalam larutan HCl menggunakan D<sub>2</sub>EHPA/K

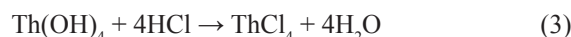
alir proses pengestrakan pelarut torium menggunakan D<sub>2</sub>EHPA/K.

#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### KEPEKATAN TORIUM DAN UNSUR NADIR BUMI DALAM LARUTAN AKUEUS (TH-RE)Cl<sub>4</sub>

Jadual 1 menunjukkan kepekatan unsur torium-nadir bumi dalam larutan akueus (Th-RE)Cl<sub>4</sub> pada kepekatan 3M dan 4M HCl. Keputusan kajian menunjukkan kepekatan kandungan torium dalam kepekatan 3M dan 4M HCl masing-masing ialah 119.40 ± 3.43 dan 121.13 ± 3.18 ppm. Jumlah kepekatan nadir bumi ringan (La, Ce, Pr, Nd, Sm dan Gd) dalam kepekatan HCl 3M dan 4M masing-masing ialah 585.56 dan 597.49 ppm. Antara unsur nadir bumi ringan, unsur Ce didapati hadir pada kepekatan yang tinggi iaitu 275.63 ± 0.71 - 280.30 ± 4.56 ppm, manakala La berada dalam julat 116.48 ± 3.07 - 117.04 ± 0.53 ppm. Seterusnya, bagi kepekatan unsur nadir bumi berat (Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb dan Lu) adalah pada julat 0.20 ± 0.00 - 5.46 ± 0.06 ppm. Hasil ini menunjukkan kandungan Ce adalah paling tinggi diikuti oleh torium, La dan unsur nadir bumi berat. Hal ini kerana monazit merupakan mineral fosfat yang kaya dengan unsur nadir bumi ringan dan torium (Al-Areqi et al. 2017). Di samping itu, faktor lain mempengaruhi kepekatan unsur ini adalah daripada proses pemendakan terpilih dengan kepekatan sesuai bagi torium adalah pada pH1.08 - 1.84 (Bahri et al. 2016). Namun begitu penyelarasan pH bagi sebatian (Th-RE)(OH)<sub>4</sub> ini dilakukan pada pH2.2. Perbandingan kedua-dua asid ini dilakukan dalam melihat perbezaan

kepekatan awal sebelum fasa pengestrakan dan kajian ini mendapati kepekatan unsur dalam larutan akueus 3M dan 4M HCl ini tidak menunjukkan perbezaan yang ketara. Maka fasa pengestrakan boleh dilakukan pada asid yang lebih rendah. Walau bagaimanapun, merujuk kepada tindak balas stokiometri (persamaan 3), sebanyak 1:4 nisbah Th(OH)<sub>4</sub> dan HCl diperlukan untuk menukarkan Th(OH)<sub>4</sub> kepada torium klorida (ThCl<sub>4</sub>).

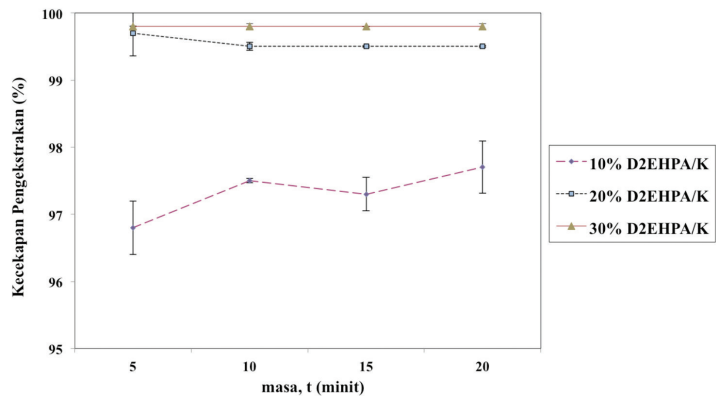


##### PENGEKSTRAKAN TORIUM DARIPADA LARUTAN AKUEUS (TH-RE)Cl<sub>4</sub> MENGGUNAKAN D<sub>2</sub>EHPA/K

Pengestrakan torium telah dilakukan menggunakan kadar kepekatan pelarut organik, masa campuran dan masa pemisahan yang berbeza. Rajah 2 menunjukkan peratus kecekapan pengestrakan torium menggunakan kepekatan D<sub>2</sub>EHPA/K (10, 20 dan 30%) pada masa 5, 10, 15 dan 20 min dalam 3M HCl. Keputusan kajian mendapati penggunaan kadar 10% D<sub>2</sub>EHPA/K pada masa campuran dan pemisahan 5, 10, 15 dan 20 minit masing-masing adalah 96.8%, 97.5%, 97.3% dan 97.7%. Pada kepekatan 20% D<sub>2</sub>EHPA/K pula, peratus kecekapan pengestrakan torium bagi tempoh masa campuran dan pemisah 5 min (99.6%), 10 min (99.5%), 15 min (99.5%) dan 20 min (99.5%). Sementara itu, peratus kecekapan pengestrakan torium pada 30% D<sub>2</sub>EHPA/K ialah 99.8% bagi kesemua masa campuran dan pemisahan. Keputusan kajian ini menunjukkan 99.8% adalah kecekapan pengestrakan optimum bagi torium iaitu pada kepekatan 30% D<sub>2</sub>EHPA/K dengan masa campuran dan pemisahan

JADUAL 1. Kepekatan Th, U dan Nadir Bumi dalam larutan (Th-RE)Cl<sub>4</sub> pada kepekatan HCl 3M dan 4M

Unsur	No. Atom	Kepekatan unsur dalam larutan akueus (Th-RE)Cl <sub>4</sub> (ppm)	
		3M HCl	4M HCl
NORM			
Th	90	119.40 ± 3.43	121.13 ± 3.18
U	92	1.42 ± 0.02	1.41 ± 0.01
ΣNORM		120.82	122.54
ΣLREE			
La	57	116.48 ± 3.07	117.04 ± 0.53
Ce	58	275.63 ± 0.71	280.30 ± 4.56
Pr	59	31.89 ± 0.61	32.87 ± 0.19
Nd	60	123.74 ± 3.94	124.75 ± 1.35
Sm	62	20.05 ± 0.08	20.32 ± 0.49
Gd	64	17.77 ± 0.16	18.21 ± 0.15
ΣLREE			
Tb	65	1.72 ± 0.05	1.74 ± 0.02
Dy	66	5.46 ± 0.06	5.46 ± 0.04
Ho	67	0.77 ± 0.02	0.78 ± 0.02
Er	68	2.30 ± 0.01	2.26 ± 0.06
Tm	69	0.20 ± 0.00	0.20 ± 0.00
Yb	70	1.36 ± 0.04	1.36 ± 0.03
Lu	71	0.17 ± 0.00	0.17 ± 0.00
ΣHREE		11.98	11.97



RAJAH 2. Peratus kecekapan pengekstrakan torium menggunakan D<sub>2</sub>EHPA/K (10, 20 dan 30%) dalam masa 5, 10, 15 dan 20 min dalam 3M HCl

adalah 5 min. Merujuk kepada keputusan kajian juga didapati kecekapan pengekstrakan torium meningkat dengan peningkatan kepekatan organik D<sub>2</sub>EHPA/K. Namun begitu, peratus peningkatan tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan.

Seterusnya, Rajah 3 pula menunjukkan peratus kecekapan pengekstrakan torium menggunakan D<sub>2</sub>EHPA/K (10, 20 dan 30%) pada masa 5, 10, 15 dan 20 min dalam 4M HCl. Keputusan kajian menunjukkan bahawa kecekapan pengekstrakan torium pada kepekatan 10% D<sub>2</sub>EHPA/K adalah paling rendah iaitu dalam julat 94.6%-95.1%. Sebaliknya, pada kepekatan 20% dan 30% D<sub>2</sub>EHPA/K, kecekapan pengekstrakan torium masing-masing berada dalam julat 98.5% - 98.9% dan 98.9% - 99.6%. Masa campuran dan pemisahan 5 min menunjukkan kecekapan paling tinggi pada 30% D<sub>2</sub>EHPA/K. Keputusan kajian menunjukkan peningkatan masa campuran dan pemisahan tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan terhadap kecekapan pengekstrakan. Maka 5 min diambil sebagai masa campuran dan pemisahan yang optimum pada fasa pengekstrakan torium daripada sebatian torium-nadir bumi.

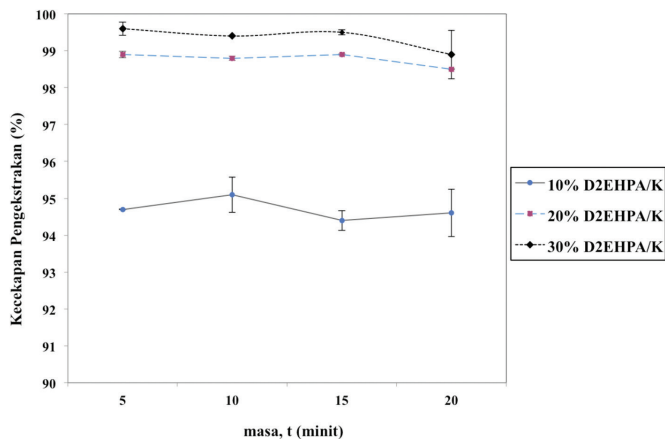
Kajian ini juga mendapati pada kepekatan 3M HCl, kecekapan pengekstrakan torium menunjukkan peratusan

kecekapan yang lebih tinggi berbanding 4M HCl (Jadual 2). Situasi ini berlaku kerana pada kepekatan asid lebih rendah, kecekapan pengekstrakan lebih tinggi melalui proses pertukaran ion (Nasab et al. 2011). Persamaan (4) menunjukkan tindak balas yang berlaku antara torium dan pelarut D<sub>2</sub>EHPA (Sato 1967).



dengan X mewakili anion (C<sub>8</sub>H<sub>17</sub>O)<sub>2</sub>PO<sub>2</sub><sup>-</sup>, (HX) merujuk kepada pelarut, manakala (aq) dan (Org) masing-masing merujuk kepada fasa akueus dan organik. Molariti asid hidroklorik yang rendah akan meningkatkan lagi tarikan unsur Th<sup>4+</sup> melalui tindak balas pertukaran kation dengan ion H<sup>+</sup> dilepaskan. Selain itu juga, sifat D<sub>2</sub>EHPA yang merupakan agen pengekstrak asid dengan proses nyah proton terjadi dan seterusnya membentuk an-ion. An-ion yang terbentuk adalah bersifat hidrofobik dan boleh mengetatkan ikatan kation daripada fasa akueus dan membentuk kelat ‘*chelate*’ yang larut organik.

Berdasarkan kepekatan optimum D<sub>2</sub>EHPA pula, peratusan tertinggi yang dicatatkan adalah pada 30% D<sub>2</sub>EHPA/K bagi 3M dan 4M HCl. Hal ini menjelaskan



RAJAH 3. Peratus kecekapan pengekstrakan torium menggunakan D<sub>2</sub>EHPA/K (10, 20 dan 30%) dalam masa 5, 10, 15 dan 20 min dalam 4M HCl

JADUAL 2. Kecekapan pengekstrakan pada masa campuran dan pemisahan optimum (5 min) pada kepekatan D<sub>2</sub>EHPA/K 10, 20 dan 30% bagi 3M dan 4M HCl

Kepekatan asid HCl, M	Kepekatan D <sub>2</sub> EHPA/K	Kepekatan awal torium, ppm	Kepekatan selepas ekstrak, ppm	Kecekapan pengekstrakan (%)
3	10%	119.40	3.73	96.87
	20%		0.40	99.67
	30%		0.26	99.78
4	10%	121.13	6.39	92.56
	20%		1.33	98.31
	30%		0.42	99.16

bahawa peningkatan kepekatan D<sub>2</sub>EHPA/K akan meningkatkan lagi kecekapan pengekstrakan torium ini. Secara keseluruhannya, kajian ini menunjukkan masa optimum bagi pengekstrakan torium adalah 5 min pada kepekatan 30% D<sub>2</sub>EHPA/K dalam 3M HCl. Oleh itu, penentuan masa optimum ini dipengaruhi oleh kepekatan asid dan juga pelarut yang digunakan.

#### KESIMPULAN

Kesimpulannya, kajian ini menunjukkan torium telah berjaya diekstrak daripada larutan (Th-RE)Cl<sub>4</sub> pada 3M dan 4M HCl menggunakan 10%, 20% dan 30% D<sub>2</sub>EHPA/K melalui kaedah pelarut pengekstrakan. Torium diekstrak pada masa 5, 10, 15 dan 20 min masing-masing dengan kecekapan pengekstrakan yang tinggi iaitu pada julat 94.3% - 97.7% (10% D<sub>2</sub>EHPA/K), 98.5% - 99.6% (20% D<sub>2</sub>EHPA/K) dan 98.9% - 99.8% (30% D<sub>2</sub>EHPA/K). Di samping itu, kecekapan pengekstrakan dipengaruhi oleh kepekatan asid yang menunjukkan pada 3M HCl, kecekapan pengekstrakan torium lebih tinggi berbanding 4M HCl. Secara keseluruhannya, kajian ini membuktikan D<sub>2</sub>EHPA berpotensi untuk digunakan sebagai agen pengekstrakan torium daripada asid hidroklorik.

#### PENGHARGAAN

Setinggi-tinggi penghargaan kepada pihak Universiti Kebangsaan Malaysia dan Kementerian Sains, Teknologi & Inovasi, Malaysia atas geran penyelidikan GGPM-2017-084 dan FP0214D052-01-2.4 DSTIN (ST-2017-005) serta kakitangan Program Sains Nuklear, UKM yang memberikan bantuan sepanjang penyelidikan ini dijalankan.

#### RUJUKAN

- Abreu, R.D. & Morais, C.A. 2014. Study on separation of heavy rare earth elements by solvent extraction with organophosphorus acids and amine reagents. *Minerals Engineering* 61: 82-87.
- Al-Areqi, W.M., Bahri, C.N.A.C.Z., Majid, A.A. & Sarmani, S. 2017. Solvent extraction of thorium from rare earth elements. *Malaysia Journal of Analytical Sciences* 21(6): 1250-1256.
- Albright, P.B. & A.S. 2009. *An Inside Look: India's Procurement of Tributyl Phosphate (TBP) for its Unsafeguarded Nuclear Program*. Institute for Science and International Security.

- Amaral, J.C.B.S. & Morais, C.A. 2010. Thorium and uranium extraction from rare earth elements in monazite sulfuric acid liquor through solvent extraction. *Minerals Engineering* 23(6): 498-503.
- Aznan, A.F. & Yim, M.S. 2015. Investigation of activated carbon adsorbent electrode for electrosorption-based uranium extraction from seawater. *Nuclear Engineering and Technology* 47(5): 579-587.
- Bahri, C.N.A.C.Z., Al-Areqi, W.M., Majid, A.A. & Ruf, M.I.F.M. 2016. Penghasilan unsur nadir bumi daripada mineral monazit menggunakan pemendakan terpilih. *Malaysian Journal of Analytical Sciences* 20(1): 44-50.
- Joo, S.H., Kim, Y.U., Kang, J.G., Yoon, H.S., Kim, D.S. & Shin, S.M. 2012. Recovery of molybdenum and rhenium using selective precipitation method from molybdenite roasting dust in alkali leaching solution. *Materials Transactions* 53(11): 2038-2042.
- Kumar, J.R., Kim, J.S., Lee, J.Y. & Yoon, H.S. 2011. A brief review on solvent extraction of uranium from acidic solutions. *Separation & Purification Reviews* 40(2): 77-125.
- Kumari, A., Panda, R., Jha, M.K., Kumar, J.R. & Lee, J.Y. 2015. Process development to recover rare earth metals from monazite mineral: A review. *Minerals Engineering* 79: 102-115.
- Nasab, E.M., Sam, A. & Alamdar Milani, S. 2011. Determination of optimum process conditions for solvent extraction of thorium using Taguchi method. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 287(1): 239-245.
- Sadri, F., Rashchi, F. & Amini, A. 2017. Hydrometallurgical digestion and leaching of Iranian monazite concentrate containing rare earth elements Th, Ce, La and Nd. *International Journal of Mineral Processing* 159: 7-15.
- Sato, T. 1967. The extraction of thorium from hydrochloric acid by TAICHI. *J. Inorg. Nuclear Chem.* 1863(1966): 296-304.
- U.S. Geological Survey (USGS). 2017. *Mineral Commodity Summaries*. p. 172. [https:// doi.org/10.3133/7018019](https://doi.org/10.3133/7018019).
- Xie, F., Zhang, T.A., Dreisinger, D. & Doyle, F. 2014. A critical review on solvent extraction of rare earths from aqueous solutions. *Minerals Engineering* 56: 10-28.

Ahmad Hayaton Jamely Mohd Salehuddin, Eli Syafiqah Aziman, Che Nor Aniza Che Zainul Bahri, Muhammad Amirul Rafiq Ahmad Affendi & Aznan Fazli Ismail\*  
 Program Sains Nuklear  
 Fakulti Sains dan Teknologi  
 Universiti Kebangsaan Malaysia  
 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
 Malaysia

Aznan Fazli Ismail\*  
Pusat Sains Terkehadapan  
Fakulti Sains dan Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia

Wan Mohd Razi Idris  
Pusat Sains Bumi dan Alam Sekitar  
Fakulti Sains dan Teknologi  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: [aznan@ukm.edu.my](mailto:aznan@ukm.edu.my)

Diserahkan: 25 April 2018

Diterima: 14 September 2018