

Sains Malaysiana 48(2)(2019): 419–424
<http://dx.doi.org/10.17576/jsm-2019-4802-20>

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 D₂EHPA 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 D₂EHPA. Kepekatan optimum pelarut D₂EHPA dalam kerosen (D₂EHPA/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)OH₄), 37% asid hidroklorik (HCl), Di-(2-etilheksil) asid fosforik (D₂EHPA) dan kerosen. Serbuk (Th-RE)OH₄ diperolehi daripada kepekatan monazit tempatan, manakala HCl dibekalkan oleh ACL LabScan. Selain itu, kedua-dua pelarut organik D₂EHPA dan kerosen dibekalkan oleh R&M Chemical.

PENYEDIAAN LARUTAN AKUEUS Th-RE TETRAKLORIDA (Th-RE)Cl₄

Serbuk (Th-RE)OH₄ telah dihasilkan melalui proses pemendakan terpilih daripada larutan larut lesap konsentrat monazit menggunakan ammonium hidroksida (NH₄OH) pada pH2.2. Seterusnya larutan akueus (Th-RE)Cl₄ disediakan dengan melarutkan 0.1 g (Th-RE)OH₄ masing-

masing ke dalam 3M dan 4M HCl. Kepekatan unsur dalam larutan akueus (Th-RE)Cl₄ telah ditentukan menggunakan Spektrometri Jisim Plasma Gandingan Teraruh (ICP-MS) model ELAN 9000 (PerkinElmer SCIEX).

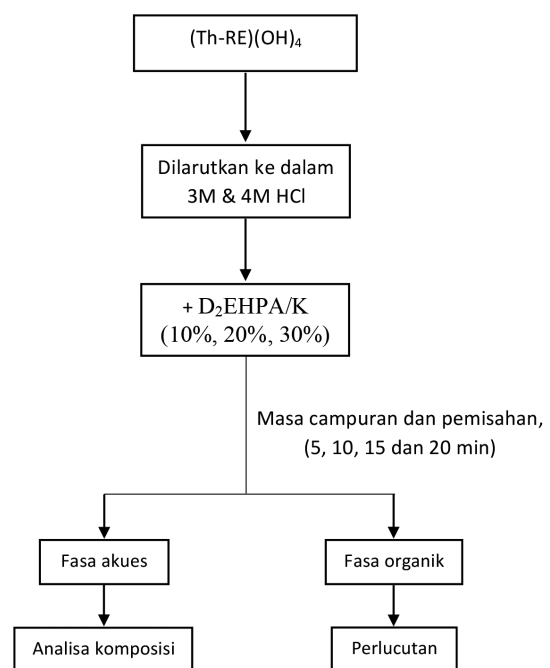
PENGEKSTRAKAN TORIUM MENGGUNAKAN D₂EHPA DALAM KEROSEN (D₂EHPA/K)

Pelarut organik disediakan dengan melarutkan 10%, 20% dan 30% D₂EHPA dalam kerosen. Larutan akueus (Th-RE)Cl₄ dicampurkan dengan organik D₂EHPA/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_o dan C masing-masing ialah kepekatan unsur sebelum dan selepas pengekstrakan; V_{aq} dan V_o 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 D₂EHPA/K

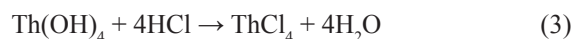
alir proses pengestrakan pelarut torium menggunakan D₂EHPA/K.

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

KEPEKATAN TORIUM DAN UNSUR NADIR BUMI DALAM LARUTAN AKUEUS (TH-RE)Cl₄

Jadual 1 menunjukkan kepekatan unsur torium-nadir bumi dalam larutan akueus (Th-RE)Cl₄ 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)₄ 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)₄ dan HCl diperlukan untuk menukarkan Th(OH)₄ kepada torium klorida (ThCl₄).

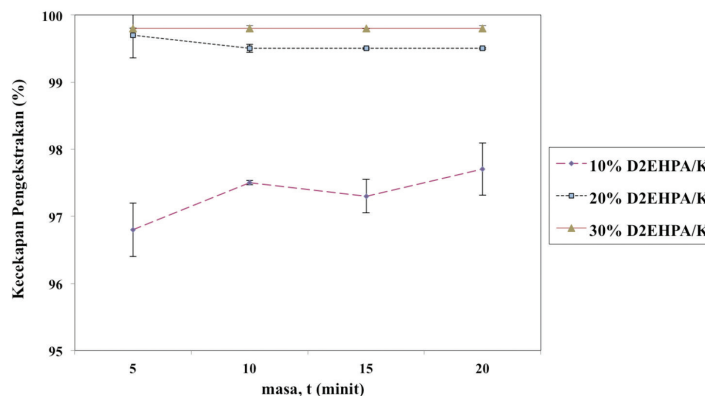


PENGEKSTRAKAN TORIUM DARIPADA LARUTAN AKUEUS (TH-RE)Cl₄ MENGGUNAKAN D₂EHPA/K

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 D₂EHPA/K (10, 20 dan 30%) pada masa 5, 10, 15 dan 20 min dalam 3M HCl. Keputusan kajian mendapati penggunaan kadar 10% D₂EHPA/K pada masa campuran dan pemisahan 5, 10, 15 dan 20 min masing-masing adalah 96.8%, 97.5%, 97.3% dan 97.7%. Pada kepekatan 20% D₂EHPA/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% D₂EHPA/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% D₂EHPA/K dengan masa campuran dan pemisahan

JADUAL 1. Kepekatan Th, U dan Nadir Bumi dalam larutan (Th-RE)Cl₄ pada kepekatan HCl 3M dan 4M

Unsur	No. Atom	Kepekatan unsur dalam larutan akueus (Th-RE)Cl ₄ (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 D₂EHPA/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 D₂EHPA/K. Namun begitu, peratus peningkatan tidak menunjukkan perbezaan yang signifikan.

Seterusnya, Rajah 3 pula menunjukkan peratus kecekapan pengekstrakan torium menggunakan D₂EHPA/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% D₂EHPA/K adalah paling rendah iaitu dalam julat 94.6%-95.1%. Sebaliknya, pada kepekatan 20% dan 30% D₂EHPA/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% D₂EHPA/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.

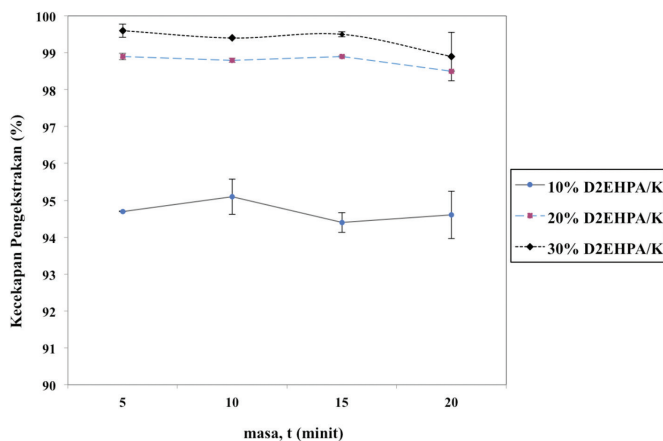
Kajian ini juga mendapati pada kepekatan 3M HCl, kecekapan pengekstrakan torium menunjukkan peratusan

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 D₂EHPA (Sato 1967).



dengan X mewakili anion (C₈H₁₇O)₂PO₂⁻, (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 Th⁴⁺ melalui tindak balas pertukaran kation dengan ion H⁺ dilepaskan. Selain itu juga, sifat D₂EHPA 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 D₂EHPA pula, peratusan tertinggi yang dicatatkan adalah pada 30% D₂EHPA/K bagi 3M dan 4M HCl. Hal ini menjelaskan



RAJAH 3. Peratus kecekapan pengekstrakan torium menggunakan D₂EHPA/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 D₂EHPA/K 10, 20 dan 30% bagi 3M dan 4M HCl

Kepekatan asid HCl, M	Kepekatan D ₂ 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 D₂EHPA/K akan meningkatkan lagi kecekapan pengekstrakan torium ini. Secara keseluruhannya, kajian ini menunjukkan masa optimum bagi pengekstrakan torium adalah 5 min pada kepekatan 30% D₂EHPA/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)Cl₄ pada 3M dan 4M HCl menggunakan 10%, 20% dan 30% D₂EHPA/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% D₂EHPA/K), 98.5% - 99.6% (20% D₂EHPA/K) dan 98.9% - 99.8% (30% D₂EHPA/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 D₂EHPA 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.
- Albraight, 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

Diserahkan: 25 April 2018

Diterima: 14 September 2018