

POTENSI TANAH LIAT KAOLIN DAN BENTONIT SEBAGAI PENJERAP ION CESIUM

Nur Diyanah Abdul Halim¹, Nur-Shahirah Alwi², Mohd Idzat Idris^{1,*}

¹Department of Applied Physics, Faculty of Science and Technology, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia

*e-mail Pengarang Rujukan: idzat@ukm.edu.my

ABSTRAK

Kemalangan nuklear seperti kemalangan reaktor di Fukushima boleh menyebabkan bekalan air tercemar dengan bahan radioaktif contohnya seperti radionuklid ^{137}Cs , ^{90}Sr dan ^{131}I . Pelbagai usaha dilakukan untuk mengasingkan ^{137}Cs dari dalam air contohnya seperti pembersihan air, penapisan oleh pasir, penjerapan oleh biru Prusia, penjerapan oleh tanah liat dan sebagainya. Penjerapan oleh tanah liat menjadi pilihan kerana menggunakan bahan semulajadi dan memerlukan kos yang rendah. Justeru kajian ini bertujuan untuk menganalisis potensi tanah liat kaolin dan bentonit sebagai agen penjerap ion cesium dan menentukan kepekatan ion cesium selepas proses penjerapan. Seterusnya menentukan kapasiti penjerapan ion cesium terhadap tanah liat kaolin dan bentonit dan akhir sekali menentukan peratusan penyingkiran ion cesium daripada larutan. Garam CsCl dilarutkan pada kepekatan 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm dan ditambahkan dengan 5 g, 0.5 g dan 0.1 g tanah liat. Sampel dianalisis menggunakan Spektrometer Jisim-Gandingan Plasma Teraruh (ICP-MS). Bagi kepekatan 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm, nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin berada dalam julat 0.01 - 0.04 mg/g dan oleh bentonit berada dalam julat 0.01 - 0.05 mg/g. Nilai peratusan penyingkiran ion cesium daripada larutan oleh kaolin berada dalam julat 75.7 - 93.2% dan oleh bentonit berada dalam julat 90.50 - 99.82%. Bagi jisim tanah liat 5 g, 0.5 g dan 0.1 g, nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin berada dalam julat 0.04 - 1.70 mg/g dan oleh bentonit berada dalam julat 0.05 - 2.21 mg/g. Nilai peratusan penyingkiran ion cesium daripada larutan oleh kaolin berada dalam julat 58.1 - 96.6 % dan oleh bentonit berada dalam julat 91.7 - 99.6%. Oleh itu tanah liat kaolin dan bentonit boleh dicadangkan sebagai penjerap ion cesium dalam menangani masalah pencemaran air apabila berlakunya pencemaran atau pengurusan sisa radioaktif yang melibatkan radionuklid Cs-137 .

Kata Kunci : Kaolin; Bentonite; cesium-137, penjerapan

ABSTRACT

Nuclear accidents such as the Fukushima accident causing the water supply may be contaminated with radioactive materials such as ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{131}I . Radionuclides are a major concern for human health if radionuclides enter the food chain. There is such a way to remove ^{137}Cs from the water for example water purification, sand filtration, adsorption by Prussian blue, adsorption by clay, and so on. Adsorption by clay is an option because it used natural materials and low cost. Therefore, this study aims to analyze the potential of kaolin and bentonite as an adsorbent of cesium ion and to determine the final concentration of cesium ion after adsorption. Next, to determine the cesium uptake and lastly determine removal percentage of cesium ion from the solution. CsCl salt is used as a surrogate for radiocesium. The CsCl was dissolved at concentrations of 1 ppm, 3 ppm, and 5 ppm and added with 5 g, 0.5 g, and 0.1 g of kaolin and bentonite. The solution was shaken by using a magnetic stirrer for

several hours. The sample was centrifuged, filtered, and analyzed using an Inductive Coupled Plasma-Mass Spectrometer (ICP-MS). For 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm, the adsorption capacity of cesium ion by kaolin was within the range between 0.01 - 0.04 mg/g and the adsorption capacity of cesium ion by bentonite were within the range between 0.01 - 0.05 mg/g. The removal percentages of cesium ion by kaolin were within the range between 75.7 - 93.2% and the removal percentages of cesium ion by bentonite were within the range between 90.5 - 99.82%. For the mass of kaolin of 5 g, 0.5 g, and 0.1 g, the adsorption capacity of cesium ion by kaolin were within the range between 0.04 - 1.70 mg/g and the adsorption capacity of cesium ion by bentonite were within the range between 0.05 - 2.21 mg/g. The removal percentages of cesium ion by kaolin were within the range between 58.1 - 96.6% and removal percentages of cesium ion by bentonite were within the range between 91.7 - 99.6%. Therefore, kaolin and bentonite can be suggested as cesium ion adsorbents to deal with water pollution or radioactive waste management especially involving radionuclide Cs-137.

Keywords: Kaolin; Bentonite; Cesium-137, adsorption

PENGENALAN

Kemalangan nuklear atau ujian bom nuklear boleh membawa kepada pencemaran pada permukaan air dan air bawah tanah. Sebagai contoh adalah kemalangan yang berlaku di Fukushima pada tahun 2011 telah menyebabkan penyebaran radionuklid di serata tempat. Daripada kemalangan tersebut, sebanyak 2.7 PBq ¹³⁷Cs telah terkontaminasi di hutan, tanah pertanian dan di kawasan pembangunan [1]. Selain itu, radionuklid dari reaktor seperti ¹³¹I, ⁹⁰Sr dan ¹³⁷Cs juga telah menyebabkan pencemaran pada tanah, air dan udara [2]. Pencemaran radionuklid yang sangat larut seperti ¹³⁷Cs memberi impak yang sangat bahaya disebabkan oleh sifatnya yang bergerak dengan medium akueus di bawah tanah [3].

¹³⁷Cs mendapat tumpuan yang besar dalam pemantauan radionuklid disebabkan setengah hayat yang agak panjang iaitu 30 tahun dan ketoksikannya kepada tubuh badan manusia. Oleh itu pelbagai cara telah dilakukan supaya dapat memisahkan dari persekitaran akuatik [4]. Kajian ini menggunakan penjerapan oleh bahan semulajadi iaitu tanah liat sebagai cara simulasi untuk menjerap radionuklid ¹³⁷Cs oleh kerana kaedah kajian yang mudah dijalankan serta bahan tanah liat yang senang didapati dan melibatkan kos yang rendah [5]. Beberapa kajian lain menggunakan tanah liat bentonite sebagai penjerap dalam rawatan sisa air dan juga sebagai penghalang semulajadi di tapak pelupusan sisa radioaktif untuk mengelak dari pencemaran tanah dan air bawah tanah melalui proses larut lesap yang mengandungi bahan radioaktif. [6]. Dalam kajian yang di buat oleh Ilya et al., tanah liat seperti bentonite dan montmorillonite berjaya menjerap 98-99 % ⁹⁰Sr dan ¹³⁷Cs [7]. Justeru kajian ini dijalankan bertujuan untuk menganalisis keupayaan tanah liat kaolin dan bentonite yang diperoleh daripada sumber tempatan sebagai penjerap ion cesium. Seterusnya kajian ini menentukan kapasiti penjerapan ion cesium oleh tanah liat kaolin dan bentonite serta menentukan peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan.

BAHAN DAN KAEDAH

Analisis Sampel Kepekatan Ion cesium Menggunakan Spektrometer Jisim-Gandingan Plasma Teraruh (ICP-MS)

Garam CsCl dilarutkan sehingga homogen dengan air suling yang diambil dari makmal Radioekologi, Sains Nuklear pada kepekatan 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm. Setelah larutan CsCl disediakan, ketiga-tiga sampel tersebut

di hantar ke ICP-MS model ELAN 6000 dalam vial yang berisi 10 ml untuk mengetahui kepekatan awal ion cesium. Seterusnya, sebanyak 50 ml larutan CsCl pada kepekatan 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm disediakan dalam kelalang kon (Pyrex) dan dicampurkan dengan sampel tanah liat kaolin dan bentonit pada jisim 5 g, 0.5 g dan 0.1 g mengikut parameter yang telah ditetapkan. Kemudian, campuran tersebut digoncangkan dengan menggunakan pengaduk magnet dengan kelajuan 2 rpm pada selama 6, 12, 18, 24 dan 30 jam mengikut setiap sampel.

Setelah penjerapan berlaku, campuran itu diemparkan dengan menggunakan mesin emparan model ALC pada kelajuan 4000 rpm selama 30 minit. Kemudian, larutan tersebut ditapis dengan menggunakan kertas turas (Whatman) bersaiz 100 mm dan dimasukkan ke dalam vial untuk dianalisis ke ICP-MS bagi mendapatkan kepekatan ion cesium selepas penjerapan.

Kapasiti Penjerapan

Selepas mendapat keputusan kepekatan akhir cesium dalam sampel dari ICP-MS, kapasiti penjerapan tanah liat dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 1.1 [8]. Nilai kepekatan ion cesium yang diperoleh dari ICP-MS digunakan dalam persamaan di bawah bagi menentukan kepekatan awal dan kepekatan akhir.

$$Q_e = V (C_o - C_f) M \dots \quad (1)$$

dimana,

Q_e = jumlah ion terserap (mg/g)

V = isipadu larutan akueus (L)

C_o = kepekatan awal (mg/L)

C_f = kepekatan akhir (mg/L)

M = jisim tanah liat (g)

Peratusan Penyingkiran

Kemudian, Persamaan 2.2 digunakan untuk menentukan peratusan penyingkiran ion cesium daripada larutan cesium [9].

$$R (\%) = (C_o - C_f) C_o \times 100 \dots \quad (2)$$

dimana,

R = peratusan pembuangan

C_o = kepekatan awal (mg/L)

C_f = kepekatan akhir (mg/L)

HASIL DAN PERBINCANGAN

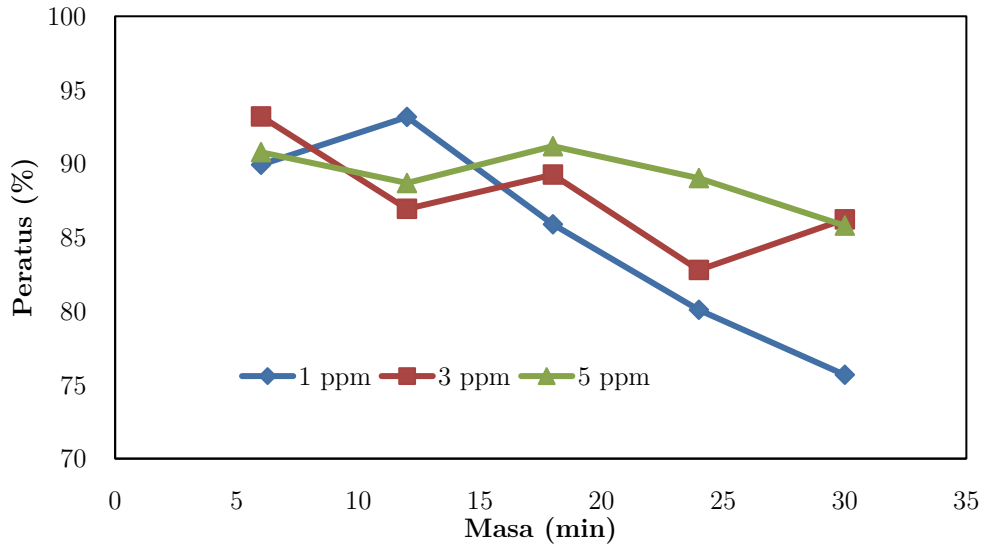
Kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin dan bentonit pada kepekatan yang berbeza

Kajian ini dijalankan terhadap kepekatan yang berbeza iaitu 1 ppm, 3 ppm dan 5 ppm dan jisim tanah liat yang sama iaitu 5 g bagi mengenalpasti masa yang optimum untuk setiap kepekatan yang berbeza. Jadual 1 menunjukkan keputusan bagi kepekatan 1, 3 dan 5 ppm untuk tanah liat kaolin dan bentonite. Daripada jadual tersebut mendapati bahawa, kedua-dua tanah liat mempunyai potensi yang sama apabila kapasiti penjerapan ion cesium didapati mencapai nilai optimum pada jam keenam hingga jam ketiga puluh iaitu sebanyak 0.01 mg/g untuk CsCl berkepekatan 1 ppm dan nilai kapasiti penjerapan bertambah dengan pertambahan kepekatan CsCl. Seterusnya bagi kepekatan 3 ppm, nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh tanah liat kaolin ialah 0.02 mg/g, manakala nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh tanah liat bentonit ialah 0.03 mg/g. Begitu juga bagi kepekatan 5 ppm, nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh tanah liat kaolin ialah 0.04 mg/g, manakala nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh tanah liat bentonit ialah 0.05 mg/g. Ini bermaksud bahawa 1 g bagi kedua-dua jenis tanah liat ini mampu untuk menyerap melebihi 0.05 mg CsCl jika nilai kepekatannya makin bertambah dan nilai maksimum penjerapan dapat ditentukan jika kapasiti penjerapan menjadi tetap dengan pertambahan kepekatan CsCl. Dalam jadual ini juga mendapati bahawa tanah liat bentonite mempunyai kapasiti penjerapan lebih banyak dari kaolin. Umum mengetahui bahawa penjerapan ion cesium ini amat bergantung kepada mekanisma pertukaran ion dalam pelbagai keadaan seperti pH [10].

Jadual 1. Kapasiti penjerapan ion cesium pada jisim tanah liat 5 g bagi kepekatan yang berbeza

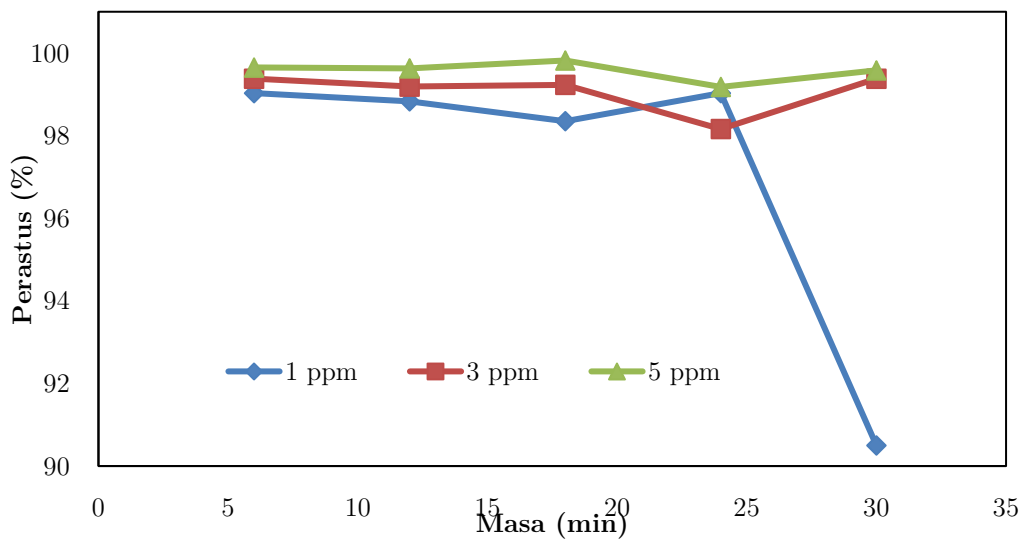
Masa (min)	Kapasiti Penjerapan Ion cesium oleh Tanah Liat (mg/g)					
	1 ppm		3 ppm		5 ppm	
	Kaolin	Bentonite	Kaolin	Bentonite	Kaolin	Bentonite
6	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
12	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
18	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
24	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
30	0.01	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

Rajah 1 menunjukkan kepekatan 1, 3 dan 5 ppm bagi nilai peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan oleh tanah liat kaolin. Daripada rajah tersebut, ia mendapati bahawa selepas 12 jam penjerapan, peratusan penyingkiran adalah paling tinggi iaitu sebanyak 93.17 % untuk sampel 1 ppm. Kajian lepas menunjukkan peratusan penyingkiran oleh kaolin meningkat dari 70.3 % kepada 92.7 % selepas 6 jam penjerapan [11]. Walaubagaimanapun bagi kepekatan 3 ppm, nilai peratusan penyingkiran ion cesium paling tinggi didapati selepas 6 jam masa penjerapan iaitu 93.21 %. Hal ini kerana penjerapan yang berlaku adalah penjerapan fizikal yang hanya melibatkan penjerapan pada permukaan, maka proses penjerapan yang berlaku adalah dalam masa yang singkat kerana hanya memerlukan ikatan dipermukaan jika dibandingkan dengan ikatan keseluruhan secara seragam melalui permukaan [12]. Manakala bagi kepekatan 5 ppm nilai peratusan penyingkiran ion cesium paling tinggi didapati pada selepas jam ke 18 iaitu 91.19 %. Secara keseluruhan, nilai kepekatan cesium yang tinggi mempunyai peratusan penyingkiran yang lebih rendah disebabkan tanah liat kaolin tidak lagi mempunyai tapak untuk berlaku penjerapan [13]. Peratus penyingkiran ion cesium dari larutan berkurangan bermula selepas masa penjerapan 12-17 jam akibat daripada penjerapan oleh kaolin yang telah maksimum.



Rajah 1. Graf peratusan penyingkiran ion cesium oleh tanah liat kaolin pada kepekatan yang berbeza (1 ppm, 3 ppm & 5 ppm)

Berdasarkan Rajah 2, ketiga-tiga proses penjerapan pada kepekatan 1, 3 dan 5 ppm oleh tanah liat bentonite menunjukkan penjerapan yang berlaku adalah menghampiri 100% dimana nilai peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan adalah sebanyak 99.03%. Proses ini bermula pada waktu yang paling singkat iaitu pada jam yang ke-6 masa penjerapan. Namun begitu, jika diperhatikan, semakin bertambahnya masa penjerapan sehingga mencapai waktu tertentu, semakin berkurangnya penjerapan yang berlaku. Seperti yang kita dapat lihat, berlakunya penurunan peratusan penjerapan pada jam ke- 24 untuk kepekatan 3 ppm dan jam ke-30 untuk kepekatan 1 ppm dan 5 ppm. Hal ini berlaku adalah kerana penjerapan fizikal secara umumnya adalah lebih lemah berbanding penjerapan kimia dan menyebabkan berlakunya penjerapan terbalik dimana ion cesium yang terjerap oleh bentonite akan larut semula ke larutan CsCl. Yaita T. et al menyatakan bahawa daya yang terlibat semasa penjerapan fizikal oleh ion cesium dengan bentonite adalah daya ikatan Van Der Waals atau daya elektrostatik dimana daya ini tidak melibatkan ikatan kimia [14]. Oleh itu, penjerapan fizikal dalam kajian ini berpotensi untuk berlaku tindak balas terbalik. Ini berbeza dengan daya yang terlibat semasa penjerapan kimia yang lebih kuat seperti kaedah pemendakan kimia, pengekstrakan pelarut dan pemisahan membran [15].



Rajah 2. Graf peratusan penyingkiran ion cesium oleh tanah liat bentonit pada kepekatan yang berbeza (1ppm, 3 ppm & 5 ppm)

Kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin dan bentonit pada jisim tanah liat yang berbeza

Kajian dijalankan terhadap jisim tanah liat yang berbeza iaitu 0.1, 0.5 dan 5 g pada kepekatan yang ditetapkan iaitu 5 ppm CsCl bagi mengenalpasti masa yang optimum untuk setiap jisim tanah liat yang berbeza. Daripada Jadual 2, ia menunjukkan jisim tanah liat sebanyak 5 g bagi kaolin dan bentonite mempunyai potensi yang hampir sama apabila kapasiti penjerapan ion cesium didapati mencapai nilai optimum pada jam pertama hingga jam kelima iaitu 0.04 mg/g bagi kaolin dan 0.05 mg/g bagi bentonite. Seterusnya, bagi jisim kaolin dan bentonite sebanyak 0.5 g, kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin berada dalam julat 0.41 - 0.45 mg/g manakala bentonite ialah 0.46 mg/g pada jam pertama hingga jam kelima. Selain itu, hasil kajian bagi jisim tanah liat sebanyak 0.1 g adalah lebih tinggi dimana, kapasiti penjerapan tertinggi ion cesium bagi kaolin ialah pada jam yang ketiga iaitu sebanyak 1.70 mg/g, manakala kapasiti penjerapan tertinggi bentonite didapati pada jam yang keempat iaitu sebanyak 2.21 mg/g.

Ini dapat dilihat bahawa pengambilan cesium oleh 0.1 g tanah liat adalah lebih banyak jika dibandingkan dengan pengambilan cesium oleh 0.5 g dan 5 g kaolin dan bentonite. Ini menunjukkan bahawa 1 g tanah liat kaolin atau bentonite boleh menjerap sehingga 2.2 mg ion cesium. Malah boleh juga dirumuskan bahawa kapasiti penjerapan bentonite lebih tinggi dari kaolin dan berkemungkinan boleh menjerap dengan kadar yang lebih tinggi (>2.2 mg) jika mempunyai kepekatan CsCl yang lebih tinggi. Menurut kajian Yildiz B. et al, kaolin mempunyai sifat penjerapan yang kurang baik berbanding bentonite disebabkan kaolin mempunyai lembaran tunggal tetrahedral silika dan octahedral alumina serta tidak mempunyai kation di ruang antara lapisan menyebabkan penjerapan kation berlaku dipermukaan sahaja [16].

Jadual 2. Kapasiti penjerapan ion cesium pada kepekatan 5 ppm bagi jisim tanah liat yang berbeza

Masa (min)	Kapasiti Penjerapan Ion Cesium oleh Tanah Liat (mg/g)					
	5 g		0.5 g		0.1 g	
	Kaolin	Bentonite	Kaolin	Bentonit	Kaolin	Bentonit
1	0.04	0.05	0.41	0.46	1.40	2.12
2	0.04	0.05	0.43	0.46	1.33	2.13
3	0.04	0.05	0.45	0.46	1.70	2.09
4	0.04	0.05	0.42	0.46	1.68	2.21
5	0.04	0.05	0.43	0.46	1.41	2.17

Secara keseluruhan, nilai kapasiti penjerapan ion cesium bagi jisim tanah liat kaolin 0.1 g adalah paling tinggi tetapi peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan didapati pada 0.5 g adalah sangat rendah seperti yang ditunjukkan dalam Jadual 3 iaitu dalam julat 60 - 75 %. Ini adalah disebabkan penjerapan kaolin yang sudah tepu dipermukaan. Manakala nilai peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan oleh bentonit 0.5 g dan 5 g ialah menghampiri 100 %. Walaubagaimanapun peratus ini berkurang pada 0.1 g bentonite disebabkan ketepuan penjerapan di permukaan tanah liat. Ketersediaan keluasan tapak pertukaran ion yang bertambah akan menambahkan nilai pengambilan ion cesium. Walaubagaimanapun nilai kapasiti penjerapan ion akan berkurangan dengan peningkatan pada jumlah tanah liat sebagai penjerap.

Jadual 3. Peratusan penyingkiran ion cesium pada kepekatan 5 ppm bagi jisim tanah liat yang berbeza

Masa (min)	Peratusan Penyingkiran Ion Cesium (%)					
	5 g		0.5 g		0.1 g	
	Kaolin	Bentonit	Kaolin	Bentonit	Kaolin	Bentonit
1	95.71	99.57	88.42	99.59	61.31	91.74
2	94.83	99.54	91.82	99.55	58.10	92.30

3	93.93	99.53	96.57	99.55	74.62	94.88
4	94.77	99.28	90.51	99.27	73.76	95.36
5	93.75	99.60	91.36	99.61	61.67	95.34

KESIMPULAN

Hasil dari kajian ini mendapati bahawa tanah liat kaolin dan bentonite berpotensi untuk menjadi penjerap ion cesium dengan baik sebagai simulasi kepada penjerapan radionuklid ^{137}Cs . Berdasarkan kajian, nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh kaolin berada dalam julat 0.01 - 1.70 mg/g dan nilai kapasiti penjerapan ion cesium oleh bentonite berada dalam julat 0.01 - 2.21 mg/g. Nilai peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan oleh kaolin didapati berada dalam julat 75.68 - 96.57 %, manakala nilai peratusan penyingkiran ion cesium dari larutan oleh bentonite didapati berada dalam julat 90.50 - 99.59 %. Kajian ini juga mendapati bahawa tanah liat bentonite mempunyai ciri dan sifat yang lebih baik jika dibandingkan dengan tanah liat kaolin sebagai penjerap ion cesium.

PENGHARGAAN

Sebahagian dari kajian ini disokong oleh Geran Universiti Penyelidikan, Universiti Kebangsaan Malaysia, UKM (GUP-2018-154). Eksperimen yang dilakukan ini juga dilakukan dengan sokongan daripada kakitangan Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM), UKM dan Pusat Pengajian Sains Sekitaran, UKM.

RUJUKAN

- [1] Yuichi O., Keisuke T., Kazuya Y., Hiroaki K., Junko T., Yoshifumi W., Frederic C., Hugh S. 2020. Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant in terrestrial systems. *Nature Reviews Earth & Environment*. (1) 644–660
- [2] Georg S., Tamon N., Kouji H.H., Katsumi S., Stephanie S., Hans-Arno S., Clemens W., Marcus C., Kenji N., Hirohiko I., Akio K. 2015. Post-Accident Sporadic Releases of Airborne Radionuclides from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Site. *Environment Science & Technology* 49, 24, 14028–14035
- [3] Bostick, B.C., Vairavamurthy, M.A., Karthikeyan K.G & Chorover J. 2002. Cesium Adsorption on Clay Minerals: An EXAFS Spectroscopic Investigation. *Environment Science & Technology* 36(12): 2670-2676.
- [4] Manolopoulou, M., Vagena, E., Stoulos, S., Ioannidou, A. & Papastefanou C. 2011. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, Northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *Journal of Environmental Radioactivity* 102 : 796-797.
- [5] Kiurski, J., Adamovic, S., Krstic, J., Oros, I. & Vojinovicmiloradov, M. 2011. Adsorption efficiency of low-cost materials in the removal of Zn(II) ions from printing developer. *Bulletin of Engineering* 4: 61-66.
- [6] Ayman F.S., Lasheen Y.F., Youssief M.A.E., Shehata F.A., Aboaly M.M. Removal of some radionuclides from contaminated solution using natural clay: Bentonite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 300(3):969-979
- [7] Ilya N.V., Viktoriya O.Z., Yana Y.K., Elena I.L., Elena V.Z. 2021. Sorption of ^{90}Sr and ^{137}Cs on clays used to build safety barriers in radioactive waste storage facilities. *Nuclear Energy and Technology*. 7(2): 151–156.

- [8] Ishikawa, N.K. 2009. Radiocesium sorption behavior on illite, kaolinite, and their mixture. *Radioprotection* 44(5): 141-145.
- [9] Maghrabi, H.H.E. & Mikhail, S. 2014. Removal of Heavy Metal via Adsorption using Natural Clay Material. *Journal of Environment and Earth Science* 4(19): 2224-3216.
- [10] Petr B., Anna S., Tolganay E., Anna R., Sergey Z., Olga D., Ekaterina T., Yulia I., Inna T., Michail C., Victoria K. 2019. Cesium Sorption and Desorption on Glauconite, Bentonite, Zeolite, and Diatomite. *Minerals*. 9 (10), 625.
- [11] Adeyemo, A.A., Adeoye, I.O. & Bello, O.S. 2017. Adsorption of dyes using different types of clay: a review. *Applied Water Science*. 7:543-568.
- [12] Mukai, H., Hirose, A., Motai, S., Kikuchi, R., Tanoi, K., Nakanishi, T. M. Kogure, T. (2016). Cesium Adsorption/Desorption Behavior Of Clay Minerals Considering Actual Contamination Conditions In Fukushima. *Scientific Reports*, 6 , 1-7.
- [13] Nsami, J.N. Mbadcam, J.K. 2013. The Adsorption Efficiency of Chemically Prepared Activated Carbon from Cola Nut Shells by $ZnCl_2$ on Methylene Blue. *Journal of Chemistry* 46(9): 1-7.
- [14] Yaita, T., Matsumura, D., Kobayashi, T., Suzuki, S., Tsuji, T., Okumura, M., Kogure, T. (2016). Investigation of Cesium Sorption Mechanisms into Clay Minerals. *Global Environmental Research*, 20 (1 & 2), 33-43.
- [15] Jianlong W., Shuting Zhuang. 2020. Cesium separation from radioactive waste by extraction and adsorption based on crown ethers and calixarenes. *Nuclear Engineering and Technology*. 52 (2) 328-336.
- [16] Yıldız B., Erten H.N., Kis M. 2011. The sorption behavior of CS^+ ion on clay minerals and zeolite in radioactive waste management: sorption kinetics and thermodynamics. *Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry*. 288:475-483.