

Penentuan Kepekatan Keradioaktifan Radionuklid Semula Jadi dan Indeks Bahaya Sinaran pada Musim Hujan dari Tanah di Kawasan Sekitar Kemudahan Simpanan Jangka Panjang (LTSF) Bukit Kledang, Perak

(Determination of Natural Radionuclide Radioactivity Concentration and Radiation Hazard Index during the Rainy Season from the Soil in the Area Around the Long-Term Storage Facility (LTSF) Bukit Kledang, Perak)

MOHD IZWAN ABDUL ADZIZ¹ & KHOO KOK SIONG^{1,2,*}

¹Jabatan Fizik Gunaan, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

²Pusat Penyelidikan Teknologi (NUKLEAR), Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan, Malaysia

Diserahkan: 22 April 2022/Diterima: 30 September 2022

ABSTRAK

Kajian dan pemantauan yang dilakukan terhadap taburan dan penentuan aktiviti keradioaktifan radionuklid semula jadi boleh dijadikan panduan dan rujukan serta amat berguna terutamanya ketika berlakunya dedahan sinaran yang tinggi dan tidak terancang daripada sumber antropogenik dan kemalangan nuklear global. Sampel tanah permukaan dari 12 lokasi yang telah dikenal pasti di sekitar kawasan kemudahan repositori telah diambil untuk dijalankan kajian analisis penentuan kepekatan keradioaktifan dan indeks bahaya sinaran. Pengukuran kepekatan radioaktif dalam sampel tanah dilakukan dengan menggunakan sistem pembilangan spektrometer gama yang dilengkapi dengan pengesanan *High Purity Germanium* (HPGe). Keputusan yang diperoleh menunjukkan kepekatan radioaktiviti ²³⁸U adalah ber julat antara 17.83 - 31.80 Bq kg⁻¹, ²³⁴Th adalah ber julat antara 23.18 - 40.64 Bq kg⁻¹, ²²⁶Ra adalah ber julat antara 20.09 - 32.80 Bq kg⁻¹, ²²⁸Ra adalah ber julat antara 21.20 - 38.88 Bq kg⁻¹ dan ⁴⁰K adalah ber julat antara 9.11 - 51.39 Bq kg⁻¹ dengan nilai purata masing-masing adalah 21.45 Bq kg⁻¹, 28.17 Bq kg⁻¹, 24.00 Bq kg⁻¹, 27.43 Bq kg⁻¹ dan 24.01 Bq kg⁻¹. Nilai kepekatan radioaktiviti radionuklid tersebut didapati setara dengan nilai yang pernah dilaporkan dalam kajian terdahulu di Semenanjung Malaysia. Nilai purata yang diperoleh bagi keempat-empat parameter Indeks Bahaya Radiasi iaitu aktiviti bersamaan radium (Ra_{eq}), kadar dos luaran (D), dos berkesan tahunan dan indeks bahaya luaran (H_{ex}) masing-masing adalah 66.37 Bq kg⁻¹, 29.13 nGy j⁻¹, 20.16 μSv dan 0.18. Nilai yang diperoleh ini adalah rendah berbanding nilai purata dunia dan nilai piawai yang diguna pakai secara global iaitu masing-masing adalah 370 Bq kg⁻¹, 57 nGy j⁻¹, 480.00 μSv dan 1.0. Perbandingan dengan kajian sebelum ini juga mendapati nilai bagi keempat-empat parameter adalah rendah dan setara. Ini menunjukkan tahap bahaya radiasi di kawasan sekitar kajian adalah selamat untuk orang ramai.

Kata kunci: Bahan radioaktif semula jadi; kemudahan repositori; musim hujan; spektrometer gama; tanah

ABSTRACT

Continuous research and monitoring on the distribution and determination of these natural radionuclides' activity as a guide and reference and are very useful, especially in an accidental exposure. Surface soil samples from 12 locations that have been identified around the repository facility area were taken for the study. Radioactive concentrations in soil samples were measured using a gamma spectrometer counting system equipped with an HPGe detector. The results obtained showed that the radioactivity concentration of ²³⁸U ranged between 17.83 - 31.80 Bq kg⁻¹, ²³⁴Th ranged between 23.18 - 40.64 Bq kg⁻¹, ²²⁶Ra ranged between 20.09 - 32.80 Bq kg⁻¹, ²²⁸Ra ranged between 21.20 - 38.88 Bq kg⁻¹ and ⁴⁰K ranged between 9.11-51.39 Bq kg⁻¹ with average values of 21.45 Bq kg⁻¹, 28.17 Bq kg⁻¹, 24.00 Bq kg⁻¹, 27.43 Bq kg⁻¹, and 24.01 Bq kg⁻¹, respectively. The values obtained from this study were low or equivalent to the values previously reported in previous studies. It was also found that the mean/mean values obtained for the four parameters of the Radiation Hazard Index, namely radium equivalent activity (Ra_{eq}), external dose rate (D), annual effective dose and external hazard index (H_{ex}) were 66.37 Bq kg⁻¹, 29.13 nGy h⁻¹, 20.16 μSv and 0.18, respectively.

These obtained values are low compared to the world average values and the values of globally applied standards (370 Bq kg⁻¹, 57nGy h⁻¹, 480.00 µSv & 1.0, respectively). Comparison with previous studies also found that the values for all four parameters were low and equivalent. This indicates that the level of radiation hazard in the area around the study is safe for the public.

Keywords: Gamma spectrometer; natural radioactive material; soil; repository facility; wet season

PENGENALAN

Kemudahan Simpanan Jangka Panjang (LTSF) Bukit Kledang, Ipoh, Perak merupakan tempat pelupusan sisa radioaktif iaitu sisa pemrosesan bahan nadir bumi yang kebanyakannya adalah torium yang terhasil akibat pengekstrakan irerium daripada monazit (Adziz, Badri & Khoo 2018). Sisa radioaktif ini merupakan bahan-bahan dari kilang Asean Rare Earth (ARE), Jalan Lahat, Ipoh, Perak yang telah tamat beroperasi pada 1994. Namun kini, setelah berpuluh tahun lamanya, kawasan pelupusan ini masih perlu dipantau tahap keradioaktifannya bagi memastikan ia selamat bagi penduduk sekitarnya. Walau bagaimanapun, data berkenaan kepekatan aktiviti keradioaktifan dan dos dedahan sinaran di kawasan pelupusan ini masih lagi kurang dan memerlukan pangkalan data yang baharu.

Radioaktiviti semula jadi wujud terutamanya daripada radionuklid primordial, seperti ⁴⁰K dari siri ²³⁸U dan ²³²Th dan produk peluruhannya seperti contoh ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr dan ²⁴¹Am yang terdapat pada aras surihan di daratan dan lautan (Tzortzis, Svoukis & Tsetos 2004). Sinar gama yang dipancarkan daripada radionuklid semula jadi juga disebut sinaran gama daratan, merupakan sumber dedahan sinaran luaran utama tubuh/anggota manusia. Keradioaktifan di alam sekitar dan dedahan sinaran luaran yang berkaitan kerana radiasi gama bergantung terutamanya pada keadaan geologi dan geografi, dan wujud pada tahap yang berbeza-beza di dalam tanah (Anagnostakis et al. 1996; Hemby & Tynybekov 2012; Iqbal, Tufail & Mirza 2000; Shender 1997).

Pengetahuan dan maklumat mengenai kepekatan aktiviti keradioaktifan dan taburan radionuklid dalam pelbagai medium matrik adalah berguna kerana ia memberikan informasi berguna dalam pemantauan radioaktiviti persekitaran. Pemantauan terhadap setiap pelepasan bahan radioaktif ke alam sekitar diperlukan untuk perlindungan alam sekitar, misalnya; jika pengukuran melebihi tahap radiasi latar belakang yang biasa, adalah penting untuk menilai apa, jika ada serta langkah berjaga-jaga yang perlu diambil.

Data mengenai aktiviti, kepekatan dan pendedaran atau taburan radionuklida bahan radioaktif kejadian semula jadi (NORM) penting dalam pemantauan radioaktiviti persekitaran, namun Malaysia pada masa

ini masih kekurangan maklumat atau informasi terutama taburan kepekatan radionuklid terrestrial/daratan dan juga pengakalan data mengenai analisis risiko radiologi dan kesihatan. Sebagai contoh, walaupun data asas berkenaan kepekatan dan taburan keradioaktifan di kawasan LTSF ini telah diwujudkan sebelum ini, adalah menjadi keperluan supaya data ini sentiasa dikemaskini dan kawasan kajian yang lebih luas diterokai sekali gus pangkalan data yang lebih komprehensif dapat diwujudkan. Bukti ilmiah mengenai potensi kesan radiasi terhadap kesihatan manusia dan alam sekitar sangat diperlukan oleh pihak kerajaan bagi mempertimbangkan sebarang keputusan mengenai rancangan pembangunan masa depan.

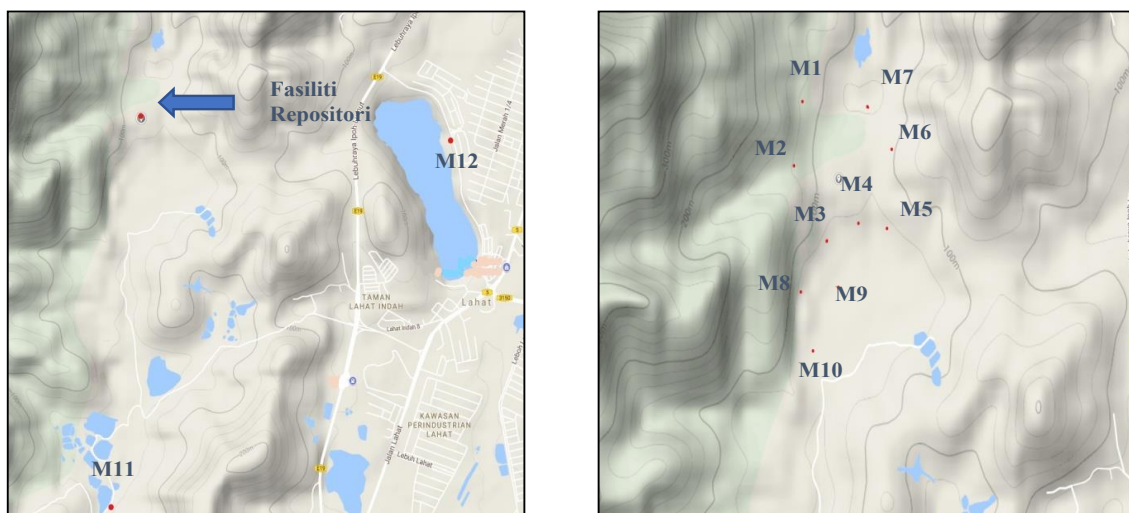
Tujuan kajian ini adalah untuk mengetahui tahap kepekatan keradioaktifan radionuklid semula jadi NORM di dalam sampel tanah semasa musim hujan yang diambil dari pelbagai lokasi persampelan di sekitar kawasan kajian dan juga untuk menentukan indeks bahaya sinaran di sekitar kemudahan repositori dengan menghitung aktiviti setara radium (Ra_{eq}), kadar dos penyerapan (D), dos berkesan tahunan dan indeks bahaya luaran (H_{ex}) (OECD 1998). Ia akan memberikan pemahaman tentang implikasi kesihatan radiologi kepada penduduk di sekitar kawasan kajian. Data yang diperoleh daripada kajian ini akan dibuat perbandingan dengan data yang telah diperoleh daripada kajian lepas semasa musim kering. Penilaian terhadap indeks bahaya kesihatan radiologi yang dilakukan untuk kedua-dua musim akan dapat menetapkan data asas bagi tahap sinaran latar belakang semula jadi di kawasan kajian.

Data yang diperoleh daripada kajian ini dapat digunakan sebagai maklumat tambahan untuk mewakili data dasar radioaktiviti daratan untuk persekitaran Malaysia. Maklumat daripada data ini juga akan menjadi asas untuk mengesan sebarang aktiviti pencemaran yang berkaitan pada masa akan datang terutama di sekitar kawasan kemudahan repositori LTSF.

KAEDAH DAN UJI KAJI

LOKASI PERSAMPELAN

Kawasan kemudahan repositori LTSF, Bukit Kledang, Perak dan kawasan sekitarnya menjadi lokasi persampelan



RAJAH 1. Lokasi stesen persampelan di sekitar fasiliti repository, Bukit Kledang, Perak

Sumber Perisian Google MAP 2021

untuk kajian ini. Kawasan ini dipilih kerana ia merupakan kawasan kemudahan repository yang di kelilingi oleh pelbagai aktiviti yang merangkumi kawasan pertanian atau ladang berskala kecil, kawasan pelancongan, jaringan anak sungai yang mengalir ke kawasan penduduk di kawasan padat seperti Pekan Menglembu (di sebelah timur) dan Pekan Papan (di sebelah selatan) dan juga beberapa kampung. Di samping itu, kawasan ini juga mempunyai beberapa lokasi yang mana tiada aktiviti yang sangat sesuai dijadikan lokasi persampelan kawalan untuk kajian ini. Sebanyak 12 stesen persampelan telah dikenal pasti dengan 2 stesen (M11 dan M12) adalah di luar kemudahan (sebagai kawalan) dan baki 10 stesen (M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9 dan M10) persampelan adalah di kawasan sekitar kemudahan repository tersebut. Lokasi stesen persampelan pensampelan ditunjukkan dalam Rajah 1.

PENGUMPULAN SAMPEL TANAH

Sampel tanah/sedimen diambil dari stesen persampelan yang telah dikenal pasti di kawasan kajian. Pemantauan dos dedahan sinar gama menggunakan meter tinjauan dengan pengesan Geiger Muller (GM) ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$) dan pengesan sodium iodida (NaI) untuk mengesan alfa, beta dan gama. Dalam kajian ini, pengukuran telah dilakukan mengikut jarak yang ditentukan 5 cm dan 1 m di atas tanah. Semua sampel dikumpulkan pada kedalaman 0-12 cm dari permukaan tanah menggunakan *hand Auger*.

Berat sampel masing-masing antara 1-2 kg untuk tanah/sedimen dan dibawa dalam beg polietilena dengan kod sampel dan dibawa ke makmal untuk proses seterusnya.

PENYEDIAAN SAMPEL TANAH

Sampel tanah dibersihkan dan dikeringkan di dalam ketuhar pada suhu $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 3-5 hari sehingga berat sampel menjadi malar. Sampel dihancurkan dan diayak (50 mikron) untuk memastikan sampelnya homogen. Sampel tersebut dimasukkan ke dalam bekas dan disimpan selama 4 minggu untuk mencapai keseimbangan sekular radioaktif antara ^{226}Ra dan produk anaknya (*respective progenies*) sebelum proses pembilangan gama dilakukan (Yang et al. 2005).

ANALISIS KEPEKATAN KERADIOAKTIFAN

Pengukuran kepekatan radioaktif semua sampel tanah dihitung secara individu menggunakan sistem pembilangan spektrometer gama germanium ketulenan tinggi (HPGe) dengan pengesan jenis-P dengan kecekapan relatif 25% selama 54000 saat. Instrumen telah dikalibrasi dengan menggunakan bahan piawaian Soil-6 (QA/QC) dan punca sumber (*point source*) ^{241}Am dan ^{60}Co untuk analisis prestasi instrumen atau *Instrument Performance Analysis* (IPA).

Aktiviti ^{40}K ditentukan dari garis tenaga γ 1460 keV, sementara aktiviti khusus ^{226}Ra akan ditentukan berdasarkan kepekatan purata ^{214}Pb pada 352 keV dan

^{214}Bi pada 609 keV. Bagi radionuklid ^{228}Ra ditentukan berdasarkan purata kepekatan tenaga γ ^{228}Ac iaitu 338 keV, 911 keV dan 968 keV. Bagi ^{232}Th , kepekatan akan ditentukan dari kepekatan purata ^{208}Tl pada 583 keV dan ^{228}Ac pada 911.21 keV (Dovlete & Povinec 2002). Manakala, bagi radionuklid ^{238}U aktiviti ditentukan berdasarkan kepekatan purata ^{214}Pb pada garis tenaga γ 295 keV, 351 keV dan juga kepekatan purata ^{214}Bi pada garis tenaga γ 609 keV, 1120 keV dan 1764 keV. Pembilangan gama dan analisis penentuan kepekatan keradioaktifan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra dan ^{40}K dilakukan di Agensi Nuklear Malaysia, Kajang, Selangor.

PENGIRAAN AKTIVITI KERADIOAKTIFAN

Kepekatan aktiviti radionuklid individu dalam sampel tanah/sedimen dihitung menggunakan Persamaan (1) seperti berikut:

$$A = \frac{N_{\text{net}}}{I_{\gamma}\epsilon m t} \quad (1)$$

dengan A ialah aktiviti gama yang dihitung (Bq kg^{-1}); N_{net} ialah luas puncak bersih sampel (*counts*); ϵ ialah kecekapan mutlak pengesanan (*detector*); I_{γ} ialah kebarangkalian pelepasan puncak foto tenaga tertentu; t ialah masa pengiraan sampel (saat); dan m ialah berat sampel (kg).

Pengiraan ini dilakukan dengan menganggap bahawa semua faktor pembetulan adalah sama.

Taburan kepekatan aktiviti disebabkan oleh radionuklid ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K tidak seragam di seluruh tanah. Ketidakteraturan dengan pendedahan sinaran telah ditakrifkan sebagai aktiviti bersamaan radium atau *radium equivalent activity* (Ra_{eq}) yang digunakan untuk mewakili nilai aktiviti khusus tiga radionuklid dengan hanya kuantiti tunggal. Ia dihitung menggunakan Persamaan 2 berikut (UNSCEAR 2000; Yasir et al. 2006):

$$\text{Ra}_{\text{eq}} = C_{\text{Ra}} + 1.43C_{\text{Th}} + 0.07C_{\text{K}} \quad (2)$$

dengan Ra_{eq} ialah aktiviti setara Ra dalam Bq kg^{-1} ; C_{Th} ialah kepekatan aktiviti ^{232}Th dalam Bq kg^{-1} ; C_{Ra} ialah kepekatan aktiviti ^{226}Ra dalam Bq kg^{-1} ; C_{K} ialah kepekatan aktiviti ^{40}K dalam Bq kg^{-1} .

Semasa mentakrifkan atau menentukan aktiviti Ra_{eq} , diandaikan bahawa 10 Bq kg^{-1} ^{226}Ra , 7 Bq kg^{-1} ^{232}Th dan 130 Bq kg^{-1} ^{40}K menghasilkan dos sinar gama yang sama (UNSCEAR 2000). Menurut rujukan UNSCEAR (1982), nilai maksimum parameter ini tidak boleh melebihi 370 Bq kg^{-1} untuk menghadkan pendedahan tahunan 1.5 mGy. Daripada kajian terdahulu (Adziz &

Khoo 2018; OECD 1998), kadar dos serapan gama luaran (D) di udara pada 1 meter di atas paras tanah dihitung menggunakan faktor 0.042 nGy j^{-1} setiap Bq kg^{-1} untuk ^{40}K , 0.462 nGy j^{-1} setiap Bq kg^{-1} untuk ^{226}Ra dan 0.604 nGy j^{-1} setiap Bq kg^{-1} untuk ^{232}Th . Pengiraan dilakukan menggunakan Persamaan (3) (Saffuwani, Saiful Azhar & Zaidi 2016) seperti berikut:

$$D = 0.462C_{\text{Ra}} + 0.604C_{\text{Th}} + 0.042C_{\text{K}} \quad (3)$$

dengan D ialah kadar dos serapan gama luaran dalam nGy j^{-1} ; C_{Th} ialah kepekatan aktiviti ^{232}Th dalam Bq kg^{-1} ; C_{Ra} ialah kepekatan aktiviti ^{226}Ra dalam Bq kg^{-1} ; dan C_{K} ialah kepekatan aktiviti ^{40}K dalam Bq kg^{-1} .

Untuk menghitung kadar dos berkesan, pekali penukaran untuk kadar dos yang diserap kepada kadar dos berkesan dan faktor penghunian luaran perlu diambil kira. Kadar dos yang diserap didapati ditukar kepada kadar dos berkesan menggunakan faktor penukaran 0.7 Sv Gy^{-1} seperti yang disyorkan oleh UNSCEAR (2000) dan faktor penghunian luaran sebanyak 0.2 dengan mengandaikan bahawa seseorang gender lelaki menghabiskan 20% masa mereka di luar (Yasir et al. 2006). Dos berkesan tahunan dihitung menggunakan Persamaan (4) seperti berikut:

$$\text{Dos berkesan tahunan (Sv)} = D \text{ nGy j}^{-1} \times 8760 \text{ j} \times 0.7 \text{ Sv Gy}^{-1} \times 0.2 \quad (4)$$

dengan D ialah kadar dos serapan gama luaran dalam nGy j^{-1} ; 0.7 ialah faktor penukaran dalam Sv Gy^{-1} ; 8760 ialah masa dalam tahun (jam); dan 0.2 ialah faktor penghunian luaran.

Bahaya luaran ialah indeks bahaya yang digunakan secara meluas dalam kajian kerana ia mewakili pendedahan luaran kepada manusia. Nilai indeks ini mestilah kurang daripada nilai uniti (nilai uniti = 1) untuk memastikan bahaya sinaran tidak ketara atau tidak signifikan. Nilai maksimum H_{ex} bersamaan dengan nilai uniti selari dengan had atas Ra_{eq} (370 Bq kg^{-1}) (Almayahi, Tajuddin & Jaafar 2012). Indeks bahaya luaran, H_{ex} , dihitung menggunakan Persamaan (5) (Saffuwani, Saiful Azhar & Zaidi 2016) seperti berikut:

$$H_{\text{ex}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{370} + \frac{C_{\text{Th}}}{259} + \frac{C_{\text{K}}}{4810} \quad (5)$$

dengan C_{Ra} ialah kepekatan aktiviti ^{226}Ra dalam Bq kg^{-1} ; C_{K} ialah kepekatan aktiviti ^{40}K dalam Bq kg^{-1} ; C_{Th} ialah kepekatan aktiviti ^{232}Th dalam Bq kg^{-1} .

KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

Hasil pengukuran aktiviti khusus radionuklid untuk 12 sampel tanah yang diambil dari lokasi stesen persampelan di sekitar kawasan tadahan air ditunjukkan pada Jadual 1.

Jadual 1 menunjukkan aktiviti khusus ^{238}U adalah antara $17.88 - 31.80 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{226}Ra antara $20.09 - 32.80 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{228}Ra antara $21.20 - 38.88 \text{ Bq kg}^{-1}$, ^{232}Th antara $23.18 - 40.64 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan ^{40}K antara $9.11 - 51.39 \text{ Bq kg}^{-1}$, dengan nilai purata untuk ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K masing-masing $21.44 \pm 2.38 \text{ Bq kg}^{-1}$, $24.00 \pm 2.63 \text{ Bq kg}^{-1}$, $27.43 \pm 1.78 \text{ Bq kg}^{-1}$, $28.17 \pm 1.91 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan

$24.01 \pm 1.97 \text{ Bq kg}^{-1}$. Kepekatan ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra dan ^{228}Ra tertinggi dicatatkan pada stesen persampelan M8 dengan nilai masing-masing $31.80 \pm 2.01 \text{ Bq kg}^{-1}$, $40.64 \pm 2.69 \text{ Bq kg}^{-1}$, $32.80 \pm 3.15 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan $38.88 \pm 2.50 \text{ Bq kg}^{-1}$, manakala kepekatan terendah untuk kedua-dua radionuklid dicatatkan pada stesen persampelan M12 dengan nilai $17.88 \pm 1.89 \text{ Bq kg}^{-1}$ untuk ^{238}U , $23.18 \pm 1.58 \text{ Bq kg}^{-1}$ untuk ^{232}Th , $20.09 \pm 2.10 \text{ Bq kg}^{-1}$ untuk ^{226}Ra dan $21.20 \pm 1.42 \text{ Bq kg}^{-1}$ untuk ^{228}Ra . Bagi ^{40}K , kepekatan tertinggi dan terendah dicatat pada stesen persampelan M6 dan M4 dengan nilai masing-masing $51.39 \pm 1.15 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan $9.11 \pm 1.00 \text{ Bq kg}^{-1}$.

JADUAL 1. Aktiviti khusus radionuklid dalam sampel tanah di lokasi yang berbeza di sekitar kawasan kemudahan repositori

Stesen	Koordinat GPS		Aktiviti khusus radionuklid (Bq kg^{-1})				
	Latitud (DMS)	Longitud (DMS)	^{238}U	^{232}Th	^{226}Ra	^{228}Ra	^{40}K
M1	N 04 ⁰ 33.338'	E 101 ⁰ 00.790'	19.97 ± 1.69	26.84 ± 1.66	21.51 ± 2.12	28.66 ± 1.70	11.69 ± 1.00
M2	N 04 ⁰ 33.195'	E 101 ⁰ 00.755'	18.83 ± 2.09	27.11 ± 1.79	22.81 ± 3.07	30.89 ± 1.80	10.28 ± 1.00
M3	N 04 ⁰ 32.999'	E 101 ⁰ 00.838'	19.81 ± 1.45	25.04 ± 0.92	22.22 ± 2.81	24.17 ± 1.0	28.99 ± 1.79
M4	N 04 ⁰ 33.294'	E 101 ⁰ 00.554'	20.82 ± 2.78	31.17 ± 1.69	22.75 ± 2.10	30.01 ± 1.60	9.11 ± 1.00
M5	N 04 ⁰ 33.044'	E 101 ⁰ 00.965'	24.42 ± 4.53	35.55 ± 2.10	26.19 ± 2.29	35.55 ± 2.15	25.89 ± 3.50
M6	N 04 ⁰ 33.154'	E 101 ⁰ 00.580'	21.87 ± 2.13	27.71 ± 1.84	27.92 ± 2.82	25.86 ± 1.50	51.39 ± 1.15
M7	N 04 ⁰ 33.284'	E 101 ⁰ 00.961'	21.84 ± 4.51	26.61 ± 2.40	23.80 ± 3.10	24.60 ± 2.45	50.11 ± 3.74
M8	N 04 ⁰ 32.538'	E 101 ⁰ 00.525'	31.80 ± 2.01	40.64 ± 2.69	32.80 ± 3.15	38.88 ± 2.50	10.20 ± 2.29
M9	N 04 ⁰ 32.848'	E 101 ⁰ 00.767'	19.84 ± 2.28	26.15 ± 3.52	21.68 ± 2.20	24.15 ± 2.40	9.13 ± 1.00
M10	N 04 ⁰ 32.442'	E 101 ⁰ 00.462'	20.41 ± 2.52	24.27 ± 1.85	21.70 ± 2.98	22.70 ± 1.80	18.54 ± 2.03
M11	N 04 ⁰ 31.468'	E 101 ⁰ 00.598'	19.83 ± 0.70	25.78 ± 0.92	24.62 ± 2.80	22.48 ± 1.00	23.55 ± 2.33
M12	N 04 ⁰ 32.526'	E 101 ⁰ 02.144'	17.88 ± 1.89	23.18 ± 1.58	20.09 ± 2.10	21.20 ± 1.42	38.90 ± 2.80
Julat			17.88 – 31.80	23.18 – 40.64	20.09 – 32.80	21.20 – 38.88	9.11 – 51.39
Purata			21.44 ± 2.38	28.17 ± 1.91	24.00 ± 2.63	27.43 ± 1.78	24.01 ± 1.97

Kajian oleh Hussain (1994) melaporkan bahawa nisbah ^{232}Th hingga ^{226}Ra di kerak bumi umumnya lebih besar daripada nilai satu (1.0). Pernyataan ini menyokong hasil kajian ini dengan nilai aktiviti purata ^{232}Th lebih

tinggi daripada ^{226}Ra dengan nisbah $^{232}\text{Th}/^{226}\text{Ra}$ adalah 1.17. Kepekatan aktiviti khusus menunjukkan nilai yang berbeza-beza dan berbeza mengikut lokasi yang mungkin dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti jenis tanah dan

pH tanah (Saffuwani, Saiful Azhar & Zaidi 2016), garis lintang kawasan, tekstur tanah, kewujudan batuan bawah tanah dan bahan organik.

Seperti yang dijelaskan sebelum ini, kajian ini hanya tertumpu pada kawasan sekitar kemudahan repositori dan kawasan berhampiran dengannya. Hasil yang diperoleh dari kajian ini hanya mewakili kawasan kajian sahaja dan tertumpu pada 12 stesen persampelan. Jadual 2 menunjukkan perbandingan nilai purata bagi aktiviti khusus radionuklid dalam sampel tanah yang diperoleh dari kajian ini dengan lokasi lain di Semenanjung

Malaysia dan negara-negara lain. Kepekatan aktiviti purata ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra dan ^{232}Th adalah setanding dengan data purata seluruh dunia (UNSCEAR 2000). Namun, untuk ^{40}K , nilainya lebih rendah (24 Bq kg^{-1}) berbanding dengan nilai min seluruh dunia (474 Bq kg^{-1}). Didapati bahawa nilai purata bagi radionuklid ^{226}Ra dan ^{232}Th adalah setanding dengan kajian terdahulu (UNSCEAR 2000) untuk musim kering bagi kawasan yang sama dan lebih rendah daripada nilai purata yang dicatatkan oleh kajian sebelumnya (Almayahi, Tajuddin & Jaafar 2012; Lee et al. 2007; Yasir et al. 2006) untuk kawasan tertentu di Semenanjung Malaysia.

JADUAL 2. Perbandingan aktiviti khusus radionuklid dalam sampel tanah di sekitar kawasan kemudahan repositori dengan lokasi lain di Semenanjung Malaysia dan negara-negara lain

Lokasi Persampelan	Aktiviti khusus radionuklid (Bq kg^{-1})					Rujukan
	^{238}U	^{226}Ra	^{228}Ra	^{232}Th	^{40}K	
Kemudahan Repositori, Bukit Kledang, Perak (Musim Hujan)	21 (17.83 - 31.80)	24 (20.09 - 32.80)	27 (21.20 - 38.88)	28 (23.18 - 40.64)	24 (9.11 - 51.39)	Kajian ini
Kemudahan Repositori, Bukit Kledang, Perak (Musim Kering)	-	21	-	33	21	Adziz & Khoo 2018
Kinta District, Perak	12 - 426	-	-	246	-	Lee et al. 2007
Pulau Pinang	-	64 - 799	-	16 - 667	-	Almayahi, Tajuddin & Jaafar 2012
Dengkil, Selangor	31.64 - 449.15	-	-	27 - 103	-	Yasir et al. 2007
Malaysia	66	67	-	82	310	
Thailand	114	48	-	40	400	
Japan	29	33	-	28	310	UNSCEAR 2000
China	33	32	-	41	440	
Purata Seluruh Dunia	35	33	-	36	474	

Nilai yang diperoleh untuk aktiviti bersamaan radium (Ra_{eq}), kadar dos gama luaran (D), dos berkesan tahunan dan indeks bahaya luaran (H_{ex}) ditunjukkan dalam Jadual 3.

Aktiviti bersamaan radium (Ra_{eq})

Merujuk kepada Jadual 3, nilai aktiviti bersamaan

radium untuk M8 (91.70 Bq kg^{-1}) adalah yang tertinggi antara lokasi persampelan lain. Walau bagaimanapun, nilai ini lebih rendah daripada nilai piawai yang dilaporkan oleh UNSCEAR (1982) iaitu 370 Bq kg^{-1} . Menurut *The Organization of Economic Cooperation and Development* (OECD 1998), nilai 370 Bq kg^{-1} adalah nilai ideal untuk pendedahan kepada orang ramai

kerana ia bersamaan dengan 1.5 mSv/tahun. Sekiranya nilai indeks keseimbangan radium adalah tinggi, ia akan menyebabkan pendedahan kepada orang ramai melebihi tahap selamat dan mungkin memberi kesan stokastik dan risiko penyakit yang timbul daripada radiasi.

Kadar dos luaran gama (D)

Purata dos luaran gama yang diserap dalam udara dihitung sebagai 29.13 nGy j⁻¹ dengan nilai minimum

dan maksimum ialah 24.46 nGy j⁻¹ dan 40.13 nGy j⁻¹. Ia didapati setanding dengan purata dunia iaitu 57 nGy j⁻¹ (UNSCEAR 2000). Penyumbang utama kepada kadar dos yang diserap di udara pada ketinggian 1 m adalah daripada sinaran gama tanah yang dijana daripada radionuklid yang wujud secara semula jadi di dalam tanah. Oleh itu, kadar dos yang diserap bergantung pada kepekatan aktiviti radionuklid tertentu. Menurut Al-Kaabi dan Al-Shimary (2016), jika kepekatan radionuklid di kawasan sampel tinggi, dos yang diserap juga akan tinggi.

JADUAL 3. Aktiviti bersamaan radium, kadar dos luaran gama, dos berkesan tahunan dan indeks bahaya luaran di semua lokasi stesen persampelan di kemudahan repositori

Stesen	Aktiviti bersamaan radium (Bq kg ⁻¹)	Kadar dos luaran (nGy j ⁻¹)	Dos efektif tahunan (μSv)	Indeks bahaya luaran
M1	60.79	26.63	18.67	0.16
M2	62.39	27.34	18.42	0.17
M3	60.26	26.60	18.30	0.16
M4	68.02	29.72	20.85	0.18
M5	79.02	34.65	24.43	0.21
M6	71.50	31.79	20.80	0.19
M7	65.71	29.16	20.25	0.18
M8	91.70	40.13	28.53	0.25
M9	59.78	26.19	18.24	0.16
M10	57.83	24.46	17.82	0.15
M11	63.30	27.93	18.49	0.17
M12	56.23	24.90	17.15	0.15
Julat	56.23 - 91.70	24.46 - 40.13	17.15 - 28.53	0.15 - 0.25
Purata	66.37	29.13	20.16	0.18

Dos berkesan tahunan

Didapati julat nilai dos berkesan tahunan adalah antara 0.01 hingga 0.03 mSv, dengan nilai purata adalah 0.02 mSv. Nilai tertinggi adalah daripada M8 (28.53 μSv). Walaupun nilai kawasan itu tinggi berbanding kawasan lain, tetapi ia masih lebih rendah berbanding purata dunia iaitu 0.48 mSv (Saffuwan, Saiful Azhar &

Zaidi 2016). Ini mengesahkan bahawa semua kawasan penyelidikan ini berada pada tahap yang selamat untuk orang ramai.

Indeks bahaya luaran (H_{ex})

Nilai pengiraan indeks bahaya luaran (H_{ex}) yang diperoleh daripada kajian ini adalah antara 0.15 hingga

0.25 dengan nilai purata adalah 0.18. Nilai tertinggi adalah dari M8 (0.25). Indeks bahaya luaran mewakili pendedahan luaran kepada manusia. Oleh itu, apabila kepekatan radionuklid primordial seperti ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K adalah tinggi di kawasan tersebut, indeks bahaya luaran juga akan tinggi. Walau bagaimanapun, memandangkan nilai daripada kajian ini adalah lebih rendah daripada nilai uniti (nilai uniti = 1) (Krieger 1981), kita boleh membuat kesimpulan bahawa bahaya sinaran adalah rendah di semua lokasi stesen persampelan.

Jadual 4 menunjukkan perbandingan indeks bahaya radiasi pada musim kering dan musim hujan di kawasan kajian. Didapati nilai purata bagi 3 parameter

iaitu aktiviti bersamaan radium (Ra_{eq}), kadar dos luaran (D) dan dos berkesan tahunan adalah tinggi sedikit pada musim kering berbanding pada musim hujan. Hasil ini disokong oleh kajian Ogundele et al. (2018) yang menunjukkan parameter ini bergantung kepada kepekatan aktiviti semula jadi khusus ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K di dalam tanah pada kawasan kajian mengikut musim. Nilai purata bagi indeks bahaya luaran (H_{ex}) adalah sama bagi kedua-dua musim. Walau bagaimanapun, nilai yang diperoleh bagi keempat-empat parameter untuk kedua-dua musim masih lagi rendah berbanding nilai purata dunia dan nilai piawai yang diguna pakai secara global. Ini menunjukkan tahap bahaya radiasi di kawasan sekitar kajian adalah selamat untuk orang ramai.

JADUAL 4. Perbandingan indeks bahaya radiasi pada musim kering dan musim hujan di kawasan sekitar kemudahan repositori serta lokasi lain di Semenanjung Malaysia dan negara-negara lain

Lokasi stesen persampelan	Indeks bahaya radiasi				Rujukan
	Aktiviti bersamaan radium (Bq kg^{-1})	Kadar dos luaran (nGy j^{-1})	Dos berkesan tahunan (μSv)	Indeks bahaya luaran	
Kemudahan					
Repositori, Bukit Kledang, Perak (Musim hujan)	66.37 (56.23 - 91.70)	29.13 (24.46 - 40.13)	20.16 (17.15 - 28.53)	0.18 (0.15 - 0.25)	Kajian ini
Kemudahan					
Repositori, Bukit Kledang, Perak (Musim kering)	68.74 (44.70 - 89.87)	30.03 (19.46 - 39.69)	36.91 (23.87 - 48.68)	0.18 (0.12 - 0.24)	Adziz & Khoo 2018
LYNAS <i>Rare-earth Processing Plant</i> , Gebeng, Pahang	139.6 (19.00 - 335.9)	64.2 (8.6 - 157.1)	-	0.39 (0.05 - 0.94)	Zal U'Yun et al. 2017.
Worldwide, UNSCEAR	-	57.0 (18.00 - 93.00)	-	-	UNSCEAR 2000
Worldwide, UNSCEAR	370	-	-	-	UNSCEAR 1982
Worldwide	-	-	480	-	Saffuwan, Saiful Azhar & Zaidi 2016
Worldwide (Unity Value)	-	-	-	<1.0	Krieger 1981

KESIMPULAN

Sampel tanah yang dikumpulkan di lokasi stesen persampelan yang berlainan di sekitar kawasan kemudahan repositori dianalisis untuk mendapatkan kepekatan aktiviti radioaktif untuk radionuklid ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K . Kepekatan aktiviti min ^{238}U , ^{226}Ra , ^{228}Ra dan ^{232}Th adalah setanding dengan data min seluruh dunia, namun untuk ^{40}K , nilainya lebih rendah (24 Bq kg^{-1}) berbanding dengan nilai min seluruh dunia (474 Bq kg^{-1}). Daripada kajian ini juga, didapati nilai purata bagi radionuklid ^{226}Ra dan ^{232}Th adalah setanding dengan kajian terdahulu (musim kering) dan lebih rendah daripada nilai purata yang dicatatkan daripada kajian sebelum ini untuk kawasan tertentu di Semenanjung Malaysia. Perbezaan ini di sesetengah lokasi mungkin dikaitkan dengan komposisi geokimia dan asal usul jenis tanah di kawasan kajian tertentu. Didapati juga, nilai purata/min yang diperoleh bagi keempat-empat parameter Indeks Bahaya Radiasi iaitu aktiviti bersamaan radium (R_{eq}), kadar dos luaran (D), dos berkesan tahunan dan indeks bahaya luaran (H_{ex}) masing-masing adalah 66.37 Bq kg^{-1} , 29.13 nGy j^{-1} , $20.16 \mu\text{Sv}$ dan 0.18 . Nilai yang diperoleh ini adalah rendah berbanding nilai purata dunia dan nilai piawaian yang diguna pakai secara global. Perbandingan dengan kajian sebelum ini juga mendapati nilai bagi keempat-empat parameter adalah rendah dan setara. Ini menunjukkan tahap bahaya dan kesan risiko radiasi di kawasan sekitar kajian adalah sangat rendah dan selamat untuk orang ramai dan penduduk sekitar. Maklumat ini akan menjadi data asas untuk mengesan sebarang aktiviti pencemaran yang berkaitan pada masa hadapan terutamanya di sekitar kawasan kemudahan repositori. Hasil daripada kajian ini boleh digunakan sebagai data tambahan untuk mewakili data asas radioaktiviti daratan untuk persekitaran Malaysia. Kajian lanjut adalah perlu bagi memperkasakan lagi pangkalan data ini pada masa hadapan.

PENGHARGAAN

Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada semua kakitangan makmal di Fakulti Sains dan Teknologi/Universiti Kebangsaan Malaysia dan juga di Makmal Radiokimia dan Alam Sekitar, Agensi Nuklear Malaysia yang terlibat secara langsung dalam penulis makalah ini.

RUJUKAN

Adziz, M.I.A. & Khoo, K.S. 2018. An assessment of absorbed dose and radiation hazard index from soil around repository facility at Bukit Kledang, Perak, Malaysia. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 298: 01200.

- Al-Kaabi, M.A. & Al-Shimary, A. 2016. Study of the radiological doses and hazard indices in soil samples from Karbala City, Iraq. *Chines Physics* 16: 331-347.
- Almayahi, B.A., Tajuddin, A.A. & Jaafar, M.S. 2012. Radiation hazard indices of soil and water samples in northern Malaysian Peninsular. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes* 70(11): 2652-2660.
- Anagnostakis, M.J., Hinis, E.P., Simopoulos, S.E. & Angelopoulos, M.G. 1996. Natural radioactivity mapping of greek surface soils. *Environmental International* 22(1): 3-8.
- Dovlete, C. & Povinec, P.P. 2002. Quantification of uncertainty in gamma spectrometric analysis of environmental samples. *2nd Regional Training Course on QA/QC of Nuclear Analytical Techniques*, 12-16 August. Kuala Lumpur.
- Hemby, D.M. & Tynybekov, A.K. 2012. Uranium, thorium and potassium in soils along the shore of the lake Issyk-Kyol in the Kyrgyz Republic. *Environ. Monit. Assess* 73: 101-108.
- Hussain, A. 1994. Deterpurataation of uranium and thorium concentration in rock samples. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 188(4): 255-265.
- Iqbal, M., Tufail, M. & Mirza, S.M. 2000. Measurement of natural radioactivity in marble found in Pakistan using a NaI(Tl) gamma-ray spectrometer. *Journal of Environmental Radioactivity* 51(2): 255-265.
- Krieger, R. 1981. Radioactivity of construction materials. *Betonwerk und Fertigteil-Technik/Concrete Precasting Plant and Technology* 47: 468.
- Lee, S.K., Husin, W., Ahmad Termizi, R. & Nursama, H.A. 2007. Natural gamma background radiation dose rate and its relationship with geological background in the Kinta district, Perak, Malaysia. *Applied Radiation and Isotopes* 54: 327-333.
- OECD. 1998. *Uranium 1997 - Resources, Production and Demand*. Paris: OECD.
- Ogundele, K.T., Oluyemi, E.A., Oyekunle, J.A.O., Makinde, O.W. & Gbenu, S.T. 2018. An evaluation of health hazards indices of natural radioactivity of the sediments from Eko-Ende Dam, Osun State, Nigeria. *Open Journal of Ecology* 8: 607-621. <https://doi.org/10.4236/oje.2018.811036>
- Saffuwan Mohamed Johar, Saiful Azhar Ahmad Tajudin & Zaidi Embong. 2016. The gamma dose assessment and pH correlation for various soil types at Batu Pahat and Kluang districts, Johor. *AIP Conference Proceedings* 1704: 050007. <https://doi.org/10.1063/1.4940103>
- Shender, M.A. 1997. Measurement of natural radioactivity levels in soil in Tripoli. *Applied Radiation and Isotopes* 48(1): 147-148.
- Tzortzis, M., Svoukis, E. & Tsetos, H. 2004. A comprehensive study of natural gamma radioactivity levels and associated dose rates from surface soils in Cyprus. *Radiation Protection Dosimetry* 109(3): 217-224.
- UNSCEAR. 2000. *Radiation Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation.

- UNSCEAR. 1982. *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*. New York: United Nations.
- Yang, Y.X., Wu, X.M., Jiang, Z.Y., Wang, W.X., Lu, J.G., Lin, J., Wang, L.M. & Hsia, Y.F. 2005. Radioactivity concentrations in soils of the Xiazhuang granite area, China. *Appl. Radiat. Isot.* 63: 255-259.
- Yasir, M.S., Majid, A.A., Tap, M.S.Q. & Abidin, M.R.Z. 2006. Analisis ^{238}U , ^{232}Th , ^{226}Ra dan ^{40}K dalam sampel amang, tanah dan air di Dengkil, Selangor menggunakan spektometri sinar gama. *Malaysia Journal of Analytical Sciences* 10(1): 35-40.
- Zal U'yun, W.M., Yii, M.W., Mohd Ashhar, K., Khairuddin, M.K., Abdul Kadir, I. & Mohd Abd Wahab, Y. 2017. Assessment of natural radioactivity level and radiological index in the vicinity of lynas rare-earth processing plants. *ASEAN J. Sci. Technol. Dev.* 34(2): 67-78.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: kho@ukm.edu.my