

Penilaian Risiko Radiologi Bahan Binaan Konkrit di Semenanjung Malaysia (Radiological Risk Assessment of Concrete Building Materials in Peninsular Malaysia)

AZNAN FAZLI ISMAIL*, AMRAN AB. MAJID, MUHAMAD SAMUDI YASIR,
REDZUWAN YAHAYA & ISMAIL BAHARI

ABSTRAK

Penggunaan bahan binaan yang mengandungi bahan radioaktif tabii (NORM) yang tinggi boleh meningkatkan kadar dos dedahan kepada penghuni di dalam sesebuah bangunan. Kebimbangan terhadap impak radiologi kepada penghuni menyebabkan perlunya dilakukan penilaian hazard radiologi yang berpunca daripada bahan binaan. Sehubungan itu, objektif kajian ini adalah untuk menentukan aras keradioaktifan tabii dalam bahan binaan di Malaysia serta menilai risiko radiologi yang diterima oleh penghuninya. Sebanyak 46 sampel pasir, 43 sampel kerikil dan 13 sampel simen Portland telah dianalisis menggunakan sistem spektrometri sinar gama. Hasil kajian mendapati kepekatan aktiviti bagi ketiga-tiga sampel bahan binaan berada pada julat 4.4 Bq kg^{-1} hingga 354.9 Bq kg^{-1} , 2.4 Bq kg^{-1} hingga 263.9 Bq kg^{-1} dan 15.1 Bq kg^{-1} hingga $1931.7 \text{ Bq kg}^{-1}$ bagi masing-masing ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K . Pengiraan kadar dos dedahan dalam bangunan mendapati semua sampel menghasilkan dos di bawah nilai $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$, iaitu jumlah had dos yang disyorkan bagi bahan binaan. Hasil analisis ke atas nilai indeks aras perwakilan sinar gama, indeks hazard luaran dan indeks hazard dalaman mendapati sebahagian sampel memberikan bacaan melebihi nilai satu, iaitu had yang ditetapkan bagi bahan binaan. Penilaian risiko radiologi kepada penghuni dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build mendapati kadar dos dedahan yang berpunca daripada simen Portland, pasir dan batu kerikil meningkat pada setiap tahun sepanjang tempoh 50 tahun.

Kata kunci: Bahan binaan; bahan radioaktif tabii; risiko radiologi; Resrad-Build

ABSTRACT

The use of building materials containing high concentration of naturally occurring radioactive material (NORM) may result in the increase of radiation dose rate inside the building. The assessment of radiological hazard in building materials is necessary due to the concern of radiological impact to its dwellers. Thus, the objectives of this study were to determine the level of natural radioactivity in Malaysia's building materials and to assess the associated radiological risk among dwellers. A total of 46 sands, 43 gravels and 13 Portland cement samples have been analysed using a gamma spectrometry system. Activity concentrations of ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K were found to be in the range of 4.4 Bq kg^{-1} to 354.9 Bq kg^{-1} , 2.4 Bq kg^{-1} to 263.9 Bq kg^{-1} and 15.1 Bq kg^{-1} to $1931.7 \text{ Bq kg}^{-1}$, respectively. The indoor dose rates were found to be lower than $1500 \mu\text{Sv year}^{-1}$, which is the recommended limit for building materials. A few samples were found to have high values of the representative gamma level index, external hazard index and internal hazard index compared to the suggested value of one. The radiological risk assessments to dwellers using Resrad-Build computer code showed that the dose rates for the Portland cement, sand and gravel increased annually over a period of 50 years.

Keywords: Building materials; natural radioactivity; radiological risk; Resrad-Build

PENDAHULUAN

Kajian ke atas dedahan sinar latar belakang dianggap penting kerana ia merupakan sumber utama dedahan sinaran mengion kepada manusia. Dianggarkan hampir 90% dedahan sinaran kepada manusia adalah berpunca daripada sumber semulajadi seperti sinaran kosmik dan gas radon (Fathivand & Amidi 2007). UNSCEAR (2000) misalnya melaporkan bahawa kadar dos dedahan sinaran yang berpunca daripada sumber semulajadi menyumbang kira-kira $2400 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$. Bahan binaan merupakan salah satu sumber dedahan sinaran kepada manusia. Pada asasnya, bahan binaan mampu menjadi pelindung terhadap sinaran yang datang daripada persekitaran luar, tetapi

dalam masa yang sama ianya mampu menjadi sumber sinaran kepada penghuni. Keadaan ini boleh berlaku sekiranya bahan binaan yang diguna mengandungi bahan radioaktif tabii (NORM) yang melebihi aras normal iaitu $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ seperti yang dicadangkan oleh ICRP (1977). Pengetahuan tentang aras dos dedahan di dalam bangunan semakin penting disebabkan sebahagian besar daripada masa seharian manusia dihabiskan di dalam bangunan. Ini menyebabkan kajian tentang NORM dalam bahan binaan telah dilakukan di seluruh dunia. Beberapa kajian yang dilakukan sebelum ini (Ahmed 2005; Amrani & Tahtat 2001; Sharaf et al. 1999) menunjukkan kadar dos dedahan dalam bangunan berhubung kait dengan kepekatan

NORM dalam bahan binaan. Matlamat utama penentuan NORM dalam bahan binaan serta penilaian dos dedahan bertujuan menghadkan atau mengurangkan dedahan sinaran mengion kepada penghuni selain memastikan bahawa bahan binaan yang digunakan mematuhi saranan antarabangsa dan seterusnya mengurangkan risiko radiologi kepada penghuni.

Batuan dan tanah merupakan komponen asas yang digunakan dalam industri pembuatan bahan binaan (Aznan et al. 2009; Kobeissi et al. 2008). Oleh sebab NORM tidak tersebar secara seragam di dalam tanah dan batuan (Slungga 1988), kepekatan NORM dalam bahan binaan berbeza mengikut kawasan ia dihasilkan (EU Recommendation 1999). Beberapa kajian yang dilakukan sebelum ini (Azlina et al. 2003; Ismail et al. 2007) menunjukkan bahawa kepekatan NORM dalam pasir buangan daripada industri pemprosesan amang di Malaysia adalah tinggi berbanding nilai purata dunia yang dilaporkan UNSCEAR (2000). Penggunaan pasir daripada sisa industri amang dalam pembinaan bangunan mampu meningkatkan kadar dos dedahan di dalam bangunan tersebut. Selain itu, industri pembuatan simen Portland di Malaysia juga menggunakan abu terbang sebagai salah satu komponen bahan mentah. Petrapoulos et al. (2002) melaporkan bahawa kepekatan NORM dalam abu terbang adalah tinggi dan penggunaannya dalam industri pembuatan bahan binaan boleh meningkatkan risiko radiologi kepada penghuni.

Radionuklid tabii seperti ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th berserta progeninya dan ^{40}K wujud sejak dari pembentukan bumi lagi dan ia boleh dijumpai dalam pelbagai bahan termasuklah tanah, batu, air, udara dan tisu benda hidup. Sehubungan itu, adalah mustahil untuk mengelakkan kehadiran NORM dalam bahan binaan. NORM dalam bahan binaan menyumbang kepada dedahan sinaran luaran melalui sinar gama yang datang daripada pereputan unsur ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th berserta progeninya dan ^{40}K serta dedahan dalaman melalui pernafasan yang disebabkan oleh terhidu gas radon (^{222}Rn) dan toron (^{220}Rn) yang terbebas (NEA-OECD 1979; ICRP 1990; EU Recommendation 1999; Aznan et al. 2009). Sehubungan itu, kajian ini dilakukan bertujuan untuk menentukan kepekatan NORM dalam bahan binaan serta melakukan penilaian risiko radiologi yang berpunca dari NORM dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build.

KAEDAH KAJIAN

PENYEDIAAN SAMPEL

Sebanyak 13 sampel simen Portland, 46 sampel pasir dan 43 sampel batu kerikil telah diperolehi dari kilang pengeluaran atau dibeli di pasaran tempatan dari 11 buah negeri di Semenanjung Malaysia sepanjang tahun 2008 hingga 2009. Setiap sampel diambil sebanyak 3 kg hingga 4 kg. Penyediaan sampel dilakukan berdasarkan kaedah IAEA Technical Report 295 (1989). Sampel dibersihkan

dan dikeringkan di dalam oven selama 48 jam pada suhu 105°C sehingga ia mencapai berat tetap. Sampel kemudiannya disejukkan pada suhu bilik sebelum diayak melepasi saiz $500\ \mu\text{m}$ bagi memastikan ia berada dalam keadaan homogen. Sampel dimasukkan ke dalam botol pembilang kedap udara jenis akrilik berisipadu $300\ \text{cm}^3$ bagi memastikan ia mempunyai geometri yang sama seperti bahan piawai yang digunakan dalam kajian ini. Berat sampel kajian berada antara 420 g hingga 530 g bergantung kepada jenis sampel. Sampel kemudian disimpan selama 30 hari bagi mencapai keseimbangan sekular antara nuklid induk (^{238}U dan ^{232}Th) dengan progeninya. Pembilangan radioaktiviti dilakukan dengan meletakkan botol pembilang di atas pengesan bagi meningkatkan kebarangkalian pengesanan tenaga sinar gama disebabkan aktiviti NORM biasanya rendah.

PENENTUAN KERADIOAKTIFAN TABII

Keradioaktifan sampel dibilang selama 12 jam menggunakan sistem spektrometri sinar gama dengan pengesan germanium hiper tulen (HPGe). Hablur HPGe berdiameter 5.0 cm dengan ketinggian 3.1 cm digunakan. Pengesan HPGe diletakkan di dalam perisai plumbum model Canberra 747 setebal 10.0 cm dan dilapisi dengan lapisan timah dan kuprum dengan masing-masing berketebalan 1.0 mm dan 1.6 mm. Penggunaan perisai ini dapat mengurangkan gangguan daripada sinar latar belakang yang berpunca dari bangunan dan sinar kosmik. Sistem spektrometri sinar gama dilaraskan supaya dapat mengesan sehingga 3000 keV tenaga foton dalam 16384 saluran dengan faktor penukaran $0.183\ \text{keV saluran}^{-1}$. Sistem denyutan analog dihubungkan melalui amplifier model AFT 2025 dengan masa pembentukan ditetapkan kepada $4\ \mu\text{s}$. Pengesan HPGe mempunyai kecekapan relatif 30% dengan leraian 1.80 keV pada puncak tenaga 1332.5 keV. Sistem spektrometri sinar gama dikalibrasi menggunakan piawai pelbagai radionuklid ^{22}Na , ^{51}Cr , ^{57}Co , ^{60}Co , ^{85}Sr , ^{88}Y , ^{109}Cd , ^{113}Sn , ^{137}Cs , $^{123\text{m}}\text{Te}$ and ^{241}Am bagi memastikan sistem sentiasa berada dalam keadaan baik. Ralat sistem pembilangan ditetapkan kepada 1-sigma mutlak. Kepekatan aktiviti ^{226}Ra ditentukan melalui puncak tenaga 351.9 keV (^{214}Pb) dan 1764.5 keV (^{214}Bi). Manakala, ^{232}Th ditentukan melalui puncak tenaga 911.2 (^{228}Ac) dan 2614.5 keV (^{208}Tl). Kepekatan aktiviti bagi ^{40}K pula ditentukan melalui puncak tenaga 1460.3 keV. Bahan rujukan (piawai) IAEA Soil-375 telah digunakan dalam kajian ini. Kepekatan keradioaktifan tabii (Bq kg^{-1}) ditentukan dengan menggunakan persamaan yang dinyatakan dalam kajian terdahulu (Aznan et al. 2009; Yasir et al. 2007):

$$W_s = \frac{M_{crm} \times A_s}{M_s \times A_{crm}} \times W_{crm}, \quad (1)$$

dengan W_s dan W_{crm} adalah kepekatan radionuklid masing-masing dalam sampel dan bahan rujukan dalam unit Bq kg^{-1} . M_s dan M_{crm} pula adalah jisim (g) masing-masing bagi sampel dan bahan rujukan manakala A_s dan A_{crm} adalah

aktiviti gama (bilangan per saat, bps) bagi sampel dan bahan rujukan.

PENILAIAN HAZARD RADIOLOGI DAN KADAR DOS DEDAHAN

Hasil analisis kepekatan aktiviti (Bq kg^{-1}) dalam sampel bahan binaan digunakan bagi menentukan indeks hazard sinaran dan kadar dos dedahan dalam bangunan. Indeks hazard sinaran digunakan bagi menentukan kepekatan NORM dalam bahan binaan. Markkanen (2001) misalnya menyatakan bahawa disebabkan lebih daripada satu radionuklid yang menjadi sumber dedahan sinaran mengion kepada penghuni, indeks hazard sinaran biasanya digunakan bagi menilai kepekatan aktiviti dalam bahan binaan. Indeks hazard sinaran juga boleh dijadikan sebagai penunjuk kepada aras kepekatan NORM serta penilaian awal terhadap hazard sinaran berpunca dari bahan binaan. Walau bagaimanapun, sebarang keputusan sama ada suatu bahan binaan itu mendatangkan risiko radiologi kepada penghuni atau tidak perlulah dinilai melalui dos dedahan. Sebanyak 3 jenis indeks hazard sinaran telah ditentukan dalam kajian ini iaitu indeks aras perwakilan sinar gama, indeks hazard luaran dan indeks hazard dalaman. Indeks aras perwakilan sinar gama (I_{vr}) ditentukan melalui persamaan seperti berikut (NEA-OECD 1979):

$$I_{\text{vr}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{150} + \frac{C_{\text{Th}}}{100} + \frac{C_{\text{K}}}{1500} = 1. \quad (2)$$

Dengan C_{Ra} , C_{Th} dan C_{K} adalah masing-masing kepekatan aktiviti (Bq kg^{-1}) bagi ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th dan ^{40}K dalam bahan binaan. Indeks hazard luaran ialah penjumlahan kepekatan aktiviti ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K yang dibahagi dengan pemalar 370 Bq kg^{-1} , 259 Bq kg^{-1} dan 4810 Bq kg^{-1} . Indeks hazard luaran digunakan untuk menganggarkan hazard sinaran luaran yang diterima oleh penghuni. Indeks hazard luaran (H_{ex}) ditentukan melalui persamaan seperti berikut (Krieger 1981):

$$H_{\text{ex}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{740} + \frac{C_{\text{Th}}}{520} + \frac{C_{\text{K}}}{9620} < 1, \quad (3)$$

dengan C_{Ra} , C_{Th} dan C_{K} masing-masing adalah kepekatan aktiviti bagi ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th dan ^{40}K dalam bahan binaan dalam unit Bq kg^{-1} . Selain dari dedahan sinaran luaran yang disebabkan oleh ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th dan ^{40}K , keseluruhan dedahan turut disumbang oleh sinaran dalaman melalui radionuklid seperti radon (^{222}Rn). Indeks hazard dalaman (H_{in}) ditentukan melalui persamaan seperti berikut (Krieger 1981; Ahmed 2005):

$$H_{\text{in}} = \frac{C_{\text{Ra}}}{185} + \frac{C_{\text{Th}}}{259} + \frac{C_{\text{K}}}{4810} < 1, \quad (4)$$

dengan C_{Ra} , C_{Th} dan C_{K} masing-masing adalah kepekatan aktiviti bagi ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th dan ^{40}K dalam bahan binaan dalam unit Bq kg^{-1} .

Penilaian dos dedahan di dalam bangunan dilakukan bagi mengetahui jumlah dos dedahan yang diterima oleh penghuni yang berpunca dari NORM dalam bahan binaan.

Dos setara tahunan ditentukan untuk mengetahui jumlah dos yang diterima oleh penghuni yang disebabkan oleh kehadiran NORM dalam bahan binaan. Dos setara tahunan (D) pada jarak 1 m dari permukaan bangunan (nSv jam^{-1}) ditentukan dengan menggunakan kaedah Monte Carlo seperti berikut (UNSCEAR 2000):

$$D = 0.7(0.462C_{\text{Ra}} + 0.604C_{\text{Th}} + 0.0417C_{\text{K}}), \quad (5)$$

dengan C_{Ra} , C_{Th} dan C_{K} masing-masing adalah kepekatan bagi ^{226}Ra (^{238}U siri), ^{232}Th dan ^{40}K dalam unit Bq kg^{-1} . Nilai pemalar 0.462, 0.604 dan 0.0417 masing-masing merujuk kepada nilai purata dunia bagi nisbah dos dedahan spesifik dengan kepekatan ^{226}Ra (siri ^{238}U), ^{232}Th dan ^{40}K dalam bahan binaan dalam unit $\text{nGy jam}^{-1}/\text{Bq kg}^{-1}$. Nilai pemalar 0.7 Sv Gy^{-1} pula adalah pemalar penukaran dos terserap (nGy jam^{-1}) kepada dos setara (nSv jam^{-1}). Bagi menilai dos dedahan di dalam bangunan, faktor jumlah masa seharian yang dihabiskan oleh penghuni di dalam bangunan perlu diambil kira. UNSCEAR (1993) melaporkan bahawa secara puratanya manusia menghabiskan kira-kira 80% daripada masa seharian dengan berada di dalam bangunan. Dengan menganggap faktor kepenghunan ialah 0.8 dengan jumlah masa tahunan terkumpul sebanyak 8760 jam, kadar dos dedahan tahunan (nSv tahun^{-1}) di dalam bangunan boleh ditentukan seperti persamaan berikut (UNSCEAR 2000):

$$D_{\text{setara}} = D \times 8760 \times 0.8. \quad (6)$$

PENILAIAN RISIKO RADIOLOGI

Penilaian risiko radiologi kepada penghuni dikira dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build versi 3.4. Resrad berasal daripada singkatan perkataan RESidue RADioactive. Resrad-Build merupakan satu kod komputer yang dibangunkan oleh *Argonne National Laboratory* (ANL) bagi menilai potensi radiologi kepada penghuni yang tinggal di dalam bangunan yang tercemar dengan radioaktif (Yu et al. 2003). Risiko radiologi kepada penghuni dinilai melalui jalan dedahan sinaran secara terus dengan sumber sinaran bagi tempoh 1, 5, 10, 20 dan 50 tahun. Keluasan bilik dan ketinggian ditetapkan kepada masing-masing 18 m^2 dan 3 m. Ketebalan dinding dan ketumpatan konkrit pula masing-masing ditetapkan kepada 13 cm dan 2.4 g cm^{-3} . Kadar pernafasan bagi penghuni bangunan ditetapkan kepada 20 m^3 sehari. Halaju pemendapan, kadar resuspensi dan kadar penghadaman ditetapkan masing-masing kepada nilai 0.01 m s^{-1} , 0.0000005 s^{-1} dan 0.0001 $\text{m}^2 \text{jam}^{-1}$.

HASIL DAN PERBINCANGAN

KEPEKATAN NORM DALAM BAHAN BINAAN

Julat dan purata kepekatan aktiviti bagi ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K dalam sampel simen Portland, pasir dan batu kerikil ditunjukkan di dalam Jadual 1. Julat kepekatan aktiviti bagi ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K dalam sampel simen Portland masing-masing adalah 14.0 – 70.5 Bq kg^{-1} , 15.8 – 58.8

JADUAL 1. Kepekatan aktiviti (Bq kg⁻¹) ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K dalam sampel simen Portland, pasir dan batu kerikil

Bahan binaan	Bil. Sampel	Kepekatan aktiviti (Bq kg ⁻¹)					
		²²⁶ Ra		²³² Th		⁴⁰ K	
		Julat	Purata	Julat	Purata	Julat	Purata
Simen Portland	13	14.0 – 70.5	34.7±15.2	15.8 – 58.8	32.9±12.4	81.9 – 382.9	190.6±76.0
Pasir	46	7.0 – 280.9	43.2±43.0	6.1 – 146.4	39.8±30.8	10.2 – 1949.5	523.9±392.9
Batu kerikil	43	3.7 – 359.3	139.8±104.0	2.0 – 370.8	109.2±76.2	27.4 – 1522.4	980.9±426.0

Bq kg⁻¹ dan 81.9 – 382.9 Bq kg⁻¹. Hasil analisis ke atas sampel pasir pula mendapati julat kepekatan aktiviti bagi ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K adalah masing-masing 7.0 – 280.9 Bq kg⁻¹, 6.1 – 146.4 Bq kg⁻¹ dan 10.2 – 1949.5 Bq kg⁻¹. Julat kepekatan aktiviti bagi ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K dalam sampel batu kerikil adalah masing-masing 3.7 – 359.3 Bq kg⁻¹, 2.0 – 370.8 Bq kg⁻¹ dan 27.4 – 1522.4 Bq kg⁻¹. Sebahagian sampel kajian didapati mempunyai kepekatan ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K melebihi dari nilai purata dunia yang dicadangkan oleh UNSCEAR (2000) iaitu 35 Bq kg⁻¹, 30 Bq kg⁻¹ dan 400 Bq kg⁻¹, masing-masing bagi ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K.

Fathivand & Amidi (2007) melaporkan bahawa purata kepekatan aktiviti bagi ²²⁶Ra (siri ²³⁸U), ²³²Th dan ⁴⁰K dalam simen di Iran berada di bawah nilai purata dunia yang dilaporkan oleh UNSCEAR (2000) manakala Lu et al. (2007) juga melaporkan hasil yang sama. Lee et al. (2004) pula mendapati kepekatan aktiviti bagi ²²⁶Ra (siri ²³⁸U) dalam simen di Ireland melebihi dari nilai purata dunia. Berdasarkan pemerhatian yang dilakukan ke atas sampel kajian, didapati terdapat sekurang-kurangnya 3 jenis batu kerikil (batu granit, batu kapur, batu syal) yang digunakan dalam pembinaan bangunan di Semenanjung Malaysia. El-Arabi et al. (2006) misalnya melaporkan kepekatan NORM yang berbeza mengikut jenis batuan sedimen (batu tanah liat, batu syal, batu pasir) di Mesir. Pavlidou et al. (2006) juga melaporkan bahawa kepekatan NORM dalam batu granit di Greece adalah tinggi berbanding nilai purata dunia (400 Bq kg⁻¹) yang dilaporkan UNSCEAR (2000). Batu kerikil ini terbentuk melalui campuran mineral pelbagai warna yang mungkin boleh mempengaruhi kadar dos sinaran sekiranya digunakan dalam pembinaan bangunan (Anjos et al. 2005). Slungga (1988) menyatakan bahawa ²²⁶Ra (siri ²³⁸U), ²³²Th dan ⁴⁰K tidak tersebar secara seragam di dalam tanah dan batuan. Oleh itu, nilai ²²⁶Ra (siri ²³⁸U), ²³²Th dan ⁴⁰K yang ditentukan dalam tanah atau batuan hanyalah mewakili purata radioaktiviti bagi sesuatu kawasan.

HAZARD RADIOLOGI BAHAN BINAAN

Hasil analisis kepekatan aktiviti (Bq kg⁻¹) dalam sampel bahan binaan digunakan bagi menentukan indeks hazard sinaran dan kadar dos dedahan dalam bangunan. Nilai indeks hazard sinaran dan kadar dos dedahan dalam bangunan yang dihasilkan oleh simen Portland, pasir dan batu kerikil masing-masing ditunjukkan dalam Jadual 2.

Nilai indeks aras perwakilan sinar gama (I_{γ}) bagi sampel simen Portland, pasir dan batu kerikil didapati masing-masing berada dalam julat 0.4 hingga 1.0, 0.1 hingga 4.6 dan 0.1 hingga 5.7, berbanding nilai had 1.0 yang dicadangkan oleh NEA-OECD (1979). Nilai indeks hazard luaran (H_{ex}) pula didapati berada dalam julat 0.1 hingga 0.2, 0.1 hingga 0.9 dan 0.1 hingga 1.1, iaitu masing-masing bagi simen Portland, pasir dan batu kerikil. Hasil kajian juga mendapati sampel simen Portland, pasir, dan batu kerikil masing-masing mempunyai julat indeks hazard dalaman (H_{in}) 0.2 hingga 0.5, 0.1 hingga 2.5 dan 0.1 hingga 3.2. Penentuan kadar dos dedahan dalam bangunan (μ Sv tahun⁻¹) (D_{setara}) pula mendapati nilai kadar dos dedahan tahunan berada dalam julat 0.1 μ Sv hingga 0.3 μ Sv, 0.1 μ Sv hingga 1.5 μ Sv dan 0.1 μ Sv hingga 1.8 μ Sv, masing-masing bagi simen Portland, pasir dan batu kerikil. Nilai kadar dos dedahan ini adalah jauh lebih rendah dari nilai had 1500 μ Sv tahun⁻¹, iaitu nilai yang dicadangkan oleh ICRP (1977) bagi bahan binaan.

SIMULASI IMPAK RADIOLOGI AKIBAT STRUKTUR KONKRIT DALAM BAHAN BINAAN

Simulasi penilaian impak radiologi kepada penghuni dilakukan dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build. Struktur konkrit seperti lantai bangunan, dinding dan tiang biasanya terdiri daripada campuran 10% simen Portland, 30% pasir dan 60% batu kerikil (James & Patrick 2007; Razak 2008). Dengan mengambil kira faktor nisbah campuran 10% simen Portland, 30% pasir dan 60% batu kerikil bagi struktur konkrit, penilaian impak radiologi kepada penghuni dilakukan berdasarkan kepekatan aktiviti ²²⁶Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K dalam bahan binaan yang diperolehi dalam kajian ini (Jadual 3). Set 1, set 2 dan set 3 masing-masing merujuk kepada kepekatan aktiviti terendah, purata kepekatan aktiviti dan nilai aktiviti tertinggi yang diperolehi dalam kajian ini.

Nilai kadar dos dedahan yang dikira dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build bagi simen Portland, pasir dan batu kerikil untuk tempoh 1 hingga 50 tahun ditunjukkan dalam Jadual 3. Hasil kajian bagi senario pertama (100% simen Portland) mendapati julat serta purata kadar dos dedahan tahunan bagi 1, 5, 10, 20 dan 50 tahun yang diterima oleh penghuni di Semenanjung Malaysia akibat penggunaan simen Portland adalah masing-masing 2.1 – 10.1 μ Sv tahun⁻¹ (purata 5.0 μ Sv tahun⁻¹), 2.7 – 12.2

JADUAL 2. Nilai indeks aras perwakilan sinar gama (I_{yr}), indeks hazard luaran (H_{ex}), indeks hazard dalaman (H_{in}) dan kadar dos dedahan dalam bangunan bagi simen Portland, pasir dan batu kerikil

Bahan Binaan	Bil. Sampel	I_{yr} Julat	H_{ex} Julat	H_{in} Julat	D_{setara} ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) Julat
Simen Portland	13	0.4 – 1.0	0.1 – 0.2	0.2 – 0.5	0.1 – 0.3
Pasir	46	0.1 – 4.6	0.1 – 0.9	0.1 – 2.5	0.1 – 1.5
Batu kerikil	43	0.1 – 5.7	0.1 – 1.1	0.1 – 3.2	0.1 – 1.8

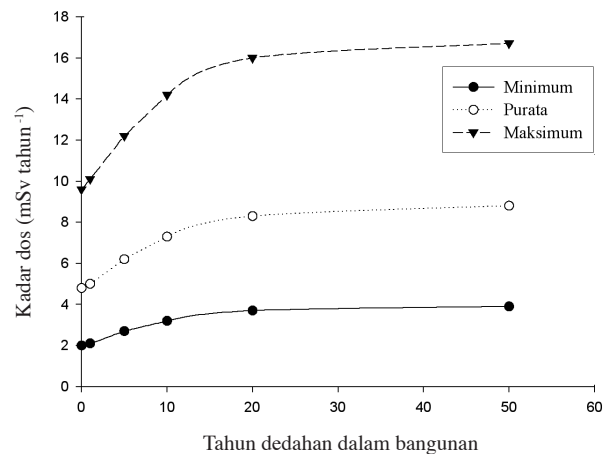
JADUAL 3. Kadar dos dedahan tahunan ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) bagi bahan binaan (konkrit) yang dikira dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build

Tahun	Kadar dos ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$)								
	10% simen Portland			30% pasir			60% batu kerikil		
	Set 1	Set 2	Set 3	Set 1	Set 2	Set 3	Set 1	Set 2	Set 3
1	2.1	5.0	10.1	2.3	25.7	125.0	3.4	130.0	292.0
5	2.7	6.2	12.2	3.0	29.9	140.0	3.9	153.0	371.0
10	3.2	7.3	14.2	3.6	34.0	155.0	4.3	176.0	447.0
20	3.7	8.3	16.0	4.2	37.7	169.0	4.6	196.0	518.0
50	3.9	8.8	16.7	4.4	39.2	174.0	4.8	204.0	546.0

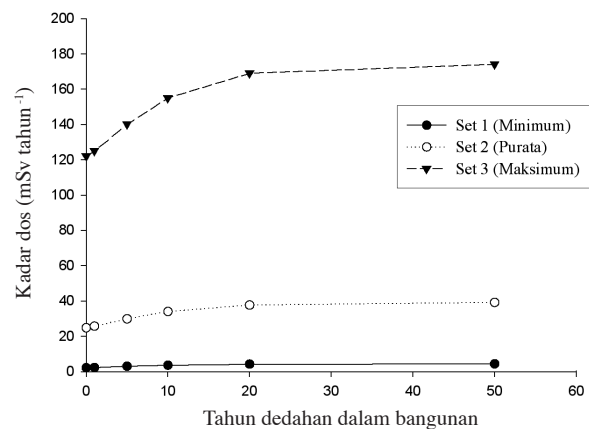
$\mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $6.2 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $3.2 - 14.2 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $7.3 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $3.7 - 16.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $8.3 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dan $3.9 - 16.7 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $8.8 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$). Berdasarkan Rajah 1, kadar dos dedahan tahunan diterima oleh penghuni di Semenanjung Malaysia akibat penggunaan simen didapati meningkat bagi setiap tahun (1, 5, 10, 20, dan 50 tahun). Kadar dos dedahan tahunan akibat penggunaan simen didapati menyumbang kira-kira 0.1% hingga 1.0% daripada nilai had $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ yang dibenarkan bagi bahan binaan.

Hasil penilaian bagi pasir pula mendapati kadar dos tahunan bagi tempoh 1, 5, 10, 20 dan 50 tahun adalah masing-masing $2.3 - 125.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $25.7 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $3.0 - 140.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $29.9 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $3.6 - 155.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $34.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $4.2 - 169.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $37.7 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dan $4.4 - 174.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $39.2 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$). Kadar dos dedahan tahunan akibat penggunaan pasir didapati meningkat dari setiap tahun seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2. Penggunaan pasir dalam pembuatan struktur konkrit didapati menyumbang kepada dos dedahan tahunan kira-kira 0.2% hingga 11% daripada nilai had $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$.

Penilaian terhadap batu kerikil pula mendapati julat serta purata kadar dos yang diterima oleh penghuni bagi 1, 5, 10, 20, dan 50 tahun masing-masing adalah $3.4 - 292.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $130.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $3.9 - 371.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $153.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $4.3 - 447.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $176.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$), $4.6 - 518 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $196.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dan $4.8 - 546.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ (purata $204.0 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$). Kadar dos dedahan bagi batu kerikil juga didapati meningkat bagi setiap tahun dan menyumbang kira-kira 0.2% hingga 36% daripada nilai had dos dedahan tahunan $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ yang

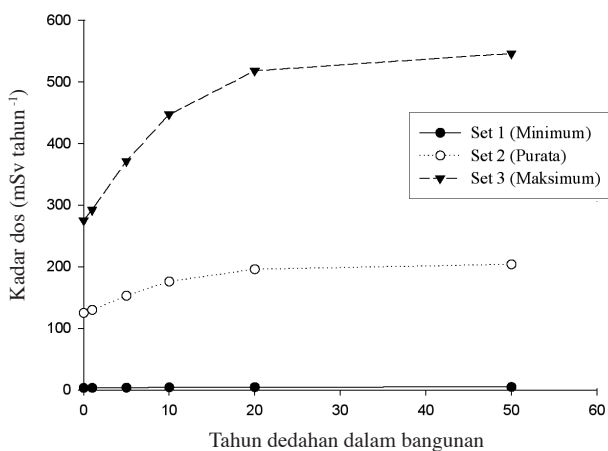


RAJAH 1. Hubungan antara kadar dos dedahan ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dengan tahun dedahan bagi simen Portland



RAJAH 2. Hubungan antara kadar dos dedahan ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dengan tahun dedahan bagi pasir

dibenarkan bagi bahan binaan. Kadar dos dedahan yang disumbangkan oleh batu kerikil ditunjukkan dalam Rajah 3.



RAJAH 3. Hubungan antara kadar dos dedahan ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) dengan tahun dedahan bagi batu kerikil

KESIMPULAN

Dalam kajian ini, kepekatan bahan radioaktif tabii (NORM) bagi 13 sampel simen Portland, 46 sampel pasir dan 43 sampel batu kerikil dari 11 buah negeri di Semenanjung Malaysia telah dianalisis. Purata kepekatan aktiviti ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K bagi sampel simen Portland ialah $34.7 \pm 15.2 \text{ Bq kg}^{-1}$, $32.9 \pm 12.4 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan $190.6 \pm 76.0 \text{ Bq kg}^{-1}$, manakala bagi sampel pasir pula ialah $43.2 \pm 43.0 \text{ Bq kg}^{-1}$, $39.8 \pm 30.8 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan $523.9 \pm 392.9 \text{ Bq kg}^{-1}$. Purata kepekatan aktiviti ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K bagi sampel batu kerikil pula ialah $139.8 \pm 104.0 \text{ Bq kg}^{-1}$, $109.2 \pm 76.2 \text{ Bq kg}^{-1}$ dan $980.9 \pm 426.0 \text{ Bq kg}^{-1}$. Sebahagian sampel didapati mempunyai nilai indeks hazard sinaran melebihi nilai had yang ditetapkan. Keadaan ini disebabkan sebahagian sampel didapati mempunyai kepekatan NORM yang tinggi. Penentuan kadar dos dedahan dalam bangunan pula mendapati kadar dos dedahan tahunan berada dalam julat $0.1 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ hingga $0.3 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$, $0.1 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ hingga $1.5 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ dan $0.1 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ hingga $1.8 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$, iaitu masing-masing bagi simen Portland, pasir dan batu kerikil. Penilaian risiko radiologi dengan menggunakan kod komputer Resrad-Build bagi tempoh 1 hingga 50 tahun mendapati nilai dos dedahan tahunan ($\mu\text{Sv tahun}^{-1}$) yang diterima oleh penghuni semakin meningkat pada setiap tahun, namun kadar dos dedahan yang diterima penghuni adalah lebih rendah daripada nilai had $1500 \mu\text{Sv tahun}^{-1}$ bagi bahan binaan. Walau bagaimanapun, nilai dos dedahan yang diperolehi dari kajian ini hanya mewakili 3 jenis bahan binaan sahaja iaitu simen Portland, pasir dan batu kerikil dan penilaian yang dilakukan juga hanyalah mewakili struktur konkrit. Sekiranya bahan binaan lain seperti jubin, batu bata, atap genting dan siling diambil kira, kadar dos dedahan tahunan dijangka lebih tinggi berbanding hasil kajian ini.

PENGHARGAAN

Setinggi penghargaan kepada pihak Kementerian Sains Teknologi & Inovasi (MOSTI) di atas geran penyelidikan 06-01-02-SF0129 serta kakitangan Program Sains Nuklear UKM yang memberikan bantuan sepanjang penyelidikan ini dijalankan.

RUJUKAN

- Ahmed, N.K. 2005. Measurement of natural radioactivity in building materials in Qena city, Upper Egypt. *Environ. Radioactivity* 83: 91-99.
- Amrani, D. & Tahtat, M. 2001. Natural radioactivity in Algerian building materials. *Appl. Radiat. Isot.* 54: 687-689.
- Anjos, R.M., Veiga, R., Soares, T., Santos, A.M.A., Aguiar, J.G., Frascá, M.H.B.O., Brage, J.A.P., Uzêda, D., Mangiaa, L., Facure, A., Mosquera, B., Carvalho, C. & Gomes, P.R.S. 2005. Natural radionuclide distribution in Brazilian commercial granites. *Rad. Measurements* 39: 245-253.
- Aznan, F. I., Yasir, M.S., Amran, Ab. M., Redzuwan, Y. & Ismail, B. 2009. Hazard radiologi radionuklid tabii dalam simen Portland Semenanjung Malaysia. *Sains Malaysiana* 38(3): 129-133.
- Azlina, M.J., Ismail, B., Yasir, M.S., Sakuma, S.K. & Khairuddin, M.K. 2003. Radiological impact assessment of radioactive minerals of amang and ilmenite on future landuse using RESRAD computer code. *Appl. Rad. Isot.* 58: 413-419.
- El-Arabi, A.M., Adel, G.E.A. & Hussein, A.S. 2006. Gamma-ray measurements of natural radioactivity in sedimentary rocks from Egypt. *Nuc. Sci. Tech.* 17: 123-128.
- EU Recommendation No. 112, 1999. *Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials*. European Commission: Luxembourg.
- Fathivand, A.A. & Amidi, J. 2007. Assessment of natural radioactivity and the associated hazard in iranian cement. *Rad. Prot. Dosimetry* 124: 145-147.
- IAEA Technical Report No. 295. 1989. *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment*. Vienna: IAEA.
- ICRP. 1977. Publication 26: *Recomendation of International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Pergamon Press.
- ICRP. 1990. Publication 60: *Recomendation of International Commission on Radiological Protection*. Oxford: Pergamon Press.
- Ismail, B., Nasirian, M. & Pauzi, A. 2007. Radioactivity and radiological risk associated with effluent sediment containing technologically enhanced naturally occurring radioactive materials in amang (tin tailings) processing industry. *Environ. Radioactivity* 95: 161-170.
- James, A. & Patrick, T. 2007. *Simplified Design of Concrete Structures*. Ed. ke-2. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Kobeissi, M.A., El-Samad, O., Zahraman, K., Milky, S., Bahsoun, F. & Abumurad, K.M. 2008. Natural radioactivity measurements in building materials in Southern Lebanon. *Environ. Radioactivity* 99: 1279-1288.
- Krieger, R. 1981. Radioactivity of Construction Materials. *Betonwerk + Fertigteile-Techn.* 47: 468-473.
- Lee, E.M., Menezes, G. & Finch, E.C. 2004. Natural radioactivity in building materials in the Republic of Ireland. *Health Phys.* 86: 378-383.

- Lu, X., Wang, F., Jia, X. & Wang, L. 2007. Radioactive analysis and radiological hazards of lime and cement fabricated in China. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 54: 327-332.
- Markkanen, M. 2001. Challenges in harmonising controls on the radioactivity of building materials within the European Union. *The Science of the Total Environ.* 272: 3-7.
- NEA-OECD. 1979. *Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Materials*. Report by NAE Group Expert, OECD: Paris.
- Pavlidou, S., Koroneos, A., Papastefanou, C., Christofides, G., Stoulos, S. & Vavelides, M. 2006. Natural radioactivity of granites used as building material. *Environ. Radioactivity* 89: 48-60.
- Petropoulos, N.P., Anagnostakis, M.J. & Simopoulos, S.E., 2002. Photon attenuation, natural radioactivity content and radon exhalation rate of building materials. *Environ. Radioactivity* 61: 257-269.
- Razak, A.H. 2008. *Auditan Kerja-kerja Konkrit*. JKR Malaysia.
- Sharaf, M., Mansy, M., El Sayed, A. & Abbas, E. 1999. Natural radioactivity and radon exhalation rates in building materials used in Egypt. *Rad. Measurement* 31: 491-495.
- Slunga, E. 1988. Radon classification of building ground. *Radiat. Prot. Dosim.* 24: 39-42.
- UNSCEAR. 1993. *Sources and biological effects*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to General Assembly, with Annexes. New York: United Nations.
- UNSCEAR. 2000. *Exposures from Natural Radiation Sources*. United Nations Scientific Committee on the effects of Atomic Radiation. Report to General Assembly, with Annexes. New York: United Nations.
- Yasir, M.S., Majid, A. Ab. & Yahaya, R. 2007. Study of natural radionuclides and its radiation hazard index in Malaysia building material. *Radioanal. Nucl. Chem.* 273: 539-541.
- Yu, C., LePoire, D.J., Cheng, J.J., Gnanapragasam E., Kamboj, S., Arnish, J., Biwer, B.M., Zielen, A.J., Williams, W.A., Wallo, III A. & Peterson, Jr. H.T. 2003. *User's Manual for RESRAD-BUILD Version 3*. Argonne's Information and Publishing Division: US.
- Pusat Pengajian Fizik Gunaan
Fakulti Sains dan Teknologi
Universiti Kebangsaan Malaysia
43600 UKM Bangi, Selangor
Malaysia
- *Pengarang untuk surat-menyurat; email: aznan_sn@yahoo.com
- Diserahkan: 25 Ogos 2009
Diterima: 17 November 2009