

## Penilaian Mineral Semula Jadi sebagai Penghadang Sinaran Mesra Alam (Evaluation of Natural Minerals as Environmentally Friendly Radiation Blockers)

NUR MIZA OSMAN, RAMZUN MAIZAN RAMLI\* & NURUL ZAHIRAH NOOR AZMAN

*Pusat Pengajian Sains Fizik, Universiti Sains Malaysia, 11800 Pulau Pinang, Malaysia*

*Diserahkan: 27 Disember 2025/Diterima: 3 Jun 2026*

### ABSTRAK

Isu alam sekitar dan kesihatan yang dikaitkan dengan bahan pelindung sinaran konvensional, terutamanya ketoksikan dan cabaran pelupusan bahan berasaskan plumbum telah mencetuskan minat yang semakin meningkat terhadap pembangunan bahan semula jadi sebagai alternatif mampan kepada penghadang berasaskan simen. Serbuk kulit kerang (SKK), serbuk kulit tiram (SKT), tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin telah dinilai berbanding simen Portland konvensional menggunakan sinaran-X pada 60, 80, 100 dan 120 kVp. Blok sampel setebal 2 cm dicirikan melalui analisis FESEM-EDX dan dinilai berdasarkan nisbah pelemahan sinaran (RAR), pekali pelemahan linear ( $\mu$ ), pekali pelemahan jisim ( $\mu/\rho$ ) dan lapisan nilai separuh (HVL). Keputusan menunjukkan bahawa simen memiliki kecekapan pelindung yang tertinggi pada semua aras tenaga, manakala SKK memperlihatkan prestasi yang setanding dengan perbezaan RAR hanya sebanyak 1.6-2.3% dan perbezaan HVL sebanyak 2.8% pada 120 kVp. Yang lebih menarik, SKK didapati mengatasi simen dari segi  $\mu/\rho$  sebanyak 3.7% pada 120 kVp. Analisis ANOVA dua-hala mengesahkan bahawa jenis bahan dan aras tenaga memberikan kesan yang signifikan secara statistik ( $p < 0.001$ ). Keputusan ini menunjukkan bahawa sisa biogen seperti kulit kerang berpotensi tinggi untuk digunakan sebagai bahan pelindung sinaran yang mampan dan kos efektif tanpa menjejaskan prestasi pelindungan secara ketara.

Kata kunci: Pelindungan sinar-X; serbuk kulit tiram (SKT); serbuk kulit kerang (SKK); simen

### ABSTRACT

Environmental and health concerns associated with conventional radiation shielding materials, particularly the toxicity and disposal challenges of lead-based materials, have sparked growing interest in the development of natural materials as sustainable alternatives to cement-based shielding. Cockle shell powder (CSP), oyster shell powder (OSP), bentonite clay, and kaolin clay were evaluated against conventional Portland cement using X-rays at 60, 80, 100, and 120 kVp. Sample blocks of 2 cm thickness were characterized through FESEM-EDX analysis and assessed based on the Radiation Attenuation Ratio (RAR), linear attenuation coefficient ( $\mu$ ), mass attenuation coefficient ( $\mu/\rho$ ), and half-value layer (HVL). The results indicate that cement possesses the highest shielding efficiency at all energy levels, while CSP demonstrated comparable performance with a RAR difference of only 1.6-2.3% and an HVL difference of 2.8% at 120 kVp. More notably, CSP was found to surpass cement in terms of  $\mu/\rho$  by 3.7% at 120 kVp. Two-way ANOVA analysis confirmed that both material type and energy level produced statistically significant effects ( $p < 0.001$ ). These findings indicate that biogenic waste, such as cockle shells holds great potential for use as a sustainable and cost-effective radiation shielding material without significantly compromising shielding performance.

Keywords: Cockle shell powder (CSP); oyster shell powder (OSP); Portland cement; x-ray shielding

### PENGENALAN

Sumber radioaktif memainkan peranan penting dalam pelbagai industri, termasuk penjanaan tenaga, bidang perubatan (diagnosis dan rawatan) serta sektor pembuatan perindustrian. Namun, sumber ini turut membawa risiko sinaran yang berbahaya, justeru mewujudkan keperluan terhadap sistem pelindungan sinaran (Muhd Afiq Hizami et al. 2022). Kesan sinaran mengion telah diperhatikan selepas insiden seperti kemalangan Chernobyl, ujian nuklear, pencemaran alam sekitar oleh sinaran dan pencemaran dalaman yang tidak disengajakan. Kajian

menunjukkan peningkatan yang tekak dalam aberasi kromosom dan kekerapan mikronukleus dalam kalangan individu yang terdedah kepada sinaran mengion (Griffey 2016). Tambahan pula, sinaran bukan sahaja berpotensi menyebabkan kerosakan organisma hidup, malah telah diiktiraf secara meluas sebagai agen karsinogen apabila berlaku pendedahan radiasi (Little 2003).

Selain sinaran primer, pelindungan sinaran juga penting untuk melindungi pekerja daripada sinaran berserak yang menjadi sumber utama pendedahan sinaran berlebihan di fasiliti penyinaran (Abdul-Majid et al. 2006;

Nur Miza et al. 2022). Plumbum (timbal) dan konkrit kebanyakannya digunakan sebagai bahan pelindung sinaran kerana sifat pelindungannya yang unggul (Nur Miza et al. 2022). Selain kosnya yang berpatutan, konkrit juga mudah dibentuk menjadi struktur kompleks dan sesuai untuk bahan pelindung neutron dan proton. Tambahan pula, sifatnya yang mempunyai ketumpatan tinggi serta kandungan air kristal yang banyak menjadikannya berkesan untuk menahan sinar alfa, sinar beta, sinar gama dan sinar-X (Han, Zhang & Ou 2017).

Namun, bahan-bahan ini memberi kesan kepada alam sekitar dan kesihatan yang signifikan, seperti plumbum yang bersifat toksik (Collin et al. 2022; Luby et al. 2024; Yu et al. 2023) dan pembuatan simen yang menyumbang kepada pelepasan besar gas rumah hijau (GHG), terutamanya karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ) (Shen et al. 2015). Pelepasan ini terutamanya berpunca daripada proses pengkalsinan bahan mentah semasa pengeluaran klinker serta pembakaran bahan api bagi mengekalkan suhu tanur yang tinggi (Ali, Saidur & Hossain 2011). Selain itu, permintaan semakin meningkat terhadap bahan mentah dalam pengeluaran simen telah menyumbang kepada pengurangan sumber yang tidak boleh diperbaharui seperti batu kapur. Aktiviti pengeluaran bahan ini daripada persekitaran semula jadi turut menjejaskan landskap, mengganggu habitat flora dan fauna serta meningkatkan risiko ketidakseimbangan ekologi (Nabilla et al. 2021).

Selain itu, pelupusan sisa kulit kerang yang tidak terkawal di tapak pelupusan sampah turut menyumbang kepada pencemaran alam sekitar. Hal ini menggariskan keperluan strategi yang berkesan dalam pengurusan sisa tersebut. Sebagai contoh, kerang-kerangan seperti tiram, kupang, simping, siput sedut dan kerang kerap dimakan, namun cangkernya dibuang dan menjadi beban kepada alam sekitar (Ephraim, ThankGod & Gbinu 2019). Keadaan ini mengakibatkan masalah ekologi dan logistik, terutamanya isu bau dan kebersihan akibat penguraian bahan organik yang tertinggal (Kim et al. 2025).

Kandungan kalsium karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) dalam kulit kerang didapati hampir menyamai kandungan dalam batu kapur (Hanis Nadiyah et al. 2021). Oleh itu, penggunaan kulit kerang sebagai pengganti separa simen untuk tujuan pembinaan telah meningkat secara berterusan (Ephraim, ThankGod & Gbinu 2019; Hanis Nadiyah et al. 2021; Kim et al. 2025; Kuo et al. 2013; Varhen, Carrillo & Ruiz 2017).  $\text{CaCO}_3$  merupakan garam kalsium bukan organik yang wujud secara semula jadi dalam pelbagai sumber, termasuk moluska bercangkang, batu kapur, kokolitofor, abu tumbuhan, kapur dan marmar (Maryam et al. 2019). Namun, penggunaan sisa kulit kerang, terutamanya kulit kerang dan tiram dalam penilaian pelindungan sinaran masih kurang dikaji secara menyeluruh.

Selain itu, tanah liat juga telah dikaji secara meluas untuk sifat pelindungan sinaran kerana memiliki ketahanan kimia yang tinggi, rintangan terhadap luluhawa, kekonduksian hidraulik yang rendah, kekerasan yang agak baik dan kelimpahan semula jadi. Sebagai contoh,

satu kajian menunjukkan tanah liat bentonit mempunyai keupayaan pelemahan yang lebih baik pada tenaga rendah berbanding tanah liat merah, tanah liat bebola dan tanah liat kaolin seperti yang dibuktikan oleh nilai  $\mu/\rho$  yang lebih tinggi (Mohamed et al. 2021).

Walaupun sisa kulit kerang telah dikaji untuk pelbagai aplikasi seperti dalam bidang pembinaan, potensinya untuk pelindungan sinaran masih kurang diterokai. Justeru, kajian ini adalah signifikan bagi mengisi jurang tersebut. Dalam penyelidikan ini, sifat pelindungan sinaran bagi kulit kerang, kulit tiram, tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin dinilai secara sistematik dan dibandingkan dengan simen sebagai bahan konvensional. Kajian ini menyumbang ke arah pembangunan alternatif mesra alam dalam bidang pelindungan sinaran serta merapatkan jurang antara pemeraksanaan nilai sisa dan keselamatan nuklear. Hasil kajian ini menunjukkan potensi dalam menyediakan laluan mampan ke arah penghasilan bahan pelindungan sinaran yang lebih mesra alam.

## BAHAN DAN METODOLOGI

### PENGUMPULAN DAN PENYEDIAAN SERBUK KULIT KERANG DAN TIRAM

Sisa kulit kerang dan tiram dikumpulkan secara tempatan daripada isi rumah, restoran dan fasiliti pemprosesan makanan laut di sekitar Pulau Pinang, Malaysia. Kulit-kulit tersebut terlebih dahulu dibersihkan menggunakan air suling bagi menyingkirkan kotoran dan sisa-sisa yang melekat kerana bendasing ini boleh menjejaskan keberkesanan bahan sebagai perisai sinaran. Kemudian, kulit kerang dikeringkan pada suhu  $130\text{ }^\circ\text{C}$  selama 3 jam untuk menghilangkan sebarang kelembapan pada kulit kerang (Nur Zahidah Jasmine et al. 2024). Cangkang yang telah kering tersebut seterusnya dihancurkan secara manual menjadi serpihan kecil dengan menggunakan lesung dan anak lesung, sebelum dikisar halus menjadi serbuk menggunakan pengisar sejagat. SKK dan SKT yang terhasil akhirnya diayak melalui ayak  $850\text{ }\mu\text{m}$ . Hanya fraksi halus yang melepasi ayak disimpan untuk digunakan, manakala bahagian kasar diulang prosesnya.

### PEMBUATAN BLOK SAMPEL

Simen Portland biasa, tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin diperoleh daripada pembekal tempatan di Malaysia. Setiap bahan terlebih dahulu diletakkan ke dalam acuan tetap berukuran  $3.2\text{ cm} \times 3.2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$  (Rajah 1) untuk menentukan jisimnya. Kemudian, 10-50 mL air ditambah untuk mencapai kelikatan yang diinginkan dan campuran dihomogenkan sepenuhnya. Sampel yang telah dihasilkan seterusnya dituang ke dalam acuan yang serupa dan dikeringkan pada suhu bilik selama 24-72 jam. Ketumpatan ( $\rho$ ) setiap blok dikira menggunakan persamaan (1), dengan membahagikan jisim ( $m$ ) dengan isi padu ( $V$ ) (Nur Zahidah Jasmine et al. 2024). Ketumpatan yang terukur dirumuskan dalam Jadual 1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

#### PENCIRIAN BAHAN

Morfologi dan komposisi unsur blok sampel yang difabrikasi dianalisis menggunakan Mikroskopi Elektron Pengimbasan Pancaran Medan (FESEM, Nova NanoSEM 450; FEI, Belanda) yang dipasangkan dengan Spektroskopi Serakan Tenaga Sinar-X (EDX). Pencitraan elektron sekunder (SE) digunakan untuk menilai morfologi permukaan, pencitraan elektron bertaburan balik (BSE) untuk kontras komposisi dan EDX untuk pengkuantitian unsur. Sebelum analisis, sampel disalut dengan lapisan nipis platinum menggunakan teknik salutan semburan untuk mengurangkan kesan cas permukaan dan meningkatkan pancaran elektron sekunder.

#### PENILAIAN SIFAT PELEMAHAN SINARAN

Sifat pelemahan sinaran sampel dinilai menggunakan penyinaran sinar-X daripada mesin sinar-X Toshiba KXO-50S (Jepun) yang beroperasi pada 60, 80, 100 dan 120 kVp dan 10 mAs. Alur sinar dikolimasikan kepada kawasan  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  dengan jarak sumber-ke-imej (SID) yang tetap iaitu 100 cm. Penyinaran dijalankan dengan dan tanpa kehadiran blok sampel, seperti yang diilustrasikan dalam Rajah 2. Foton yang ditransmisikan dikesan menggunakan peranti pengesan radiasi RaySafe X2 (Sweden) dan nilai yang sepadan dipaparkan pada unit asas RaySafe X2 (Sweden). Dos sinaran yang menembusi sampel direkodkan dalam unit  $\mu\text{Gy}$ .

Nisbah pelemahan sinaran (RAR) merujuk kepada pecahan atau peratusan sinaran tuju yang diserap oleh suatu bahan apabila sinaran elektromagnet mengenainya. Nisbah ini dinyatakan dalam persamaan (2) (Aral, Banu Nergis & Candan 2015; Nur Zahidah Jasmine et al. 2024) dengan  $I$  ialah keamatan sinaran selepas melalui sampel dan  $I_0$  ialah keamatan sinaran tanpa sampel. Nilai RAR yang lebih tinggi menunjukkan keupayaan perlindungan yang lebih baik.

$$RAR(\%) = 1 - \left( \frac{I}{I_0} \right) \times 100 \quad (2)$$

Pekali pelemahan linear ( $\mu$ ) mewakili kebarangkalian per unit panjang bagi foton untuk berinteraksi dengan sesuatu bahan sama ada melalui penyerapan atau penyerakan. Pekali ini dinyatakan dalam persamaan (3) (Hanan et al. 2022) dengan  $x$  mewakili ketebalan bahan. Semakin tinggi nilai  $\mu$ , semakin berkesan keupayaan perlindungan bahan tersebut.

$$\mu = \frac{1}{x} \ln \frac{I_0}{I} \quad (3)$$

Pekali pelemahan jisim ( $\mu/\rho$ ) ditakrifkan sebagai keupayaan sesuatu bahan untuk menyerap atau menyerakkan foton tuju per unit jisim, tanpa dipengaruhi ketumpatan fizikalnya. Pekali ini dinyatakan dalam persamaan (4) (Wesam et al. 2024) dengan  $\rho$  mewakili ketumpatan bahan. Bahan yang mempunyai nilai  $\mu/\rho$  yang tinggi adalah lebih berkesan untuk melemahkan sinaran pada jisim tertentu.

$$\mu/\rho = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

Lapisan nilai separuh (HVL) merujuk kepada ketebalan bahan yang diperlukan untuk mengurangkan keamatan sinaran kepada separuh daripada nilai asalnya. HVL dinyatakan dalam persamaan (5) (Mahmoud et al. 2022). Nilai HVL yang rendah menunjukkan bahan tersebut memerlukan ketebalan yang lebih kecil untuk melemahkan separuh daripada pancaran sinaran.

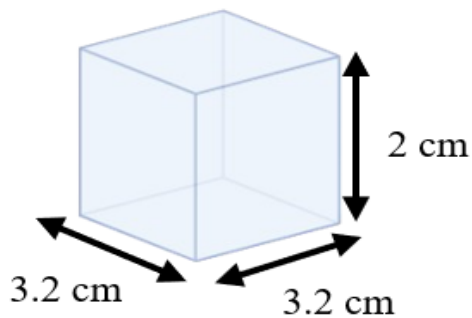
$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad (5)$$

Analisis varians dua hala (ANOVA) telah digunakan untuk menilai kesan jenis bahan dan aras tenaga sinar-X terhadap nisbah pelemahan sinaran (RAR) bagi sampel yang diuji. Pendekatan statistik dipilih kerana kajian ini melibatkan dua pemboleh ubah kategori bebas iaitu jenis bahan (simen, SKK, SKT, tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin) dan aras tenaga (60, 80, 100 dan 120 kVp) berserta satu pemboleh ubah bersandar berterusan, RAR (%). ANOVA dua hala ini menilai secara serentak: (i) kesan utama jenis bahan terhadap RAR, (ii) kesan utama aras tenaga terhadap RAR dan (iii) kesan interaksi antara jenis bahan dan aras tenaga yang menunjukkan sama ada pengaruh aras tenaga terhadap RAR berbeza mengikut lima jenis bahan tersebut.

#### HASIL KAJIAN DAN PERBINCANGAN

##### PENCIRIAN BLOK SAMPEL

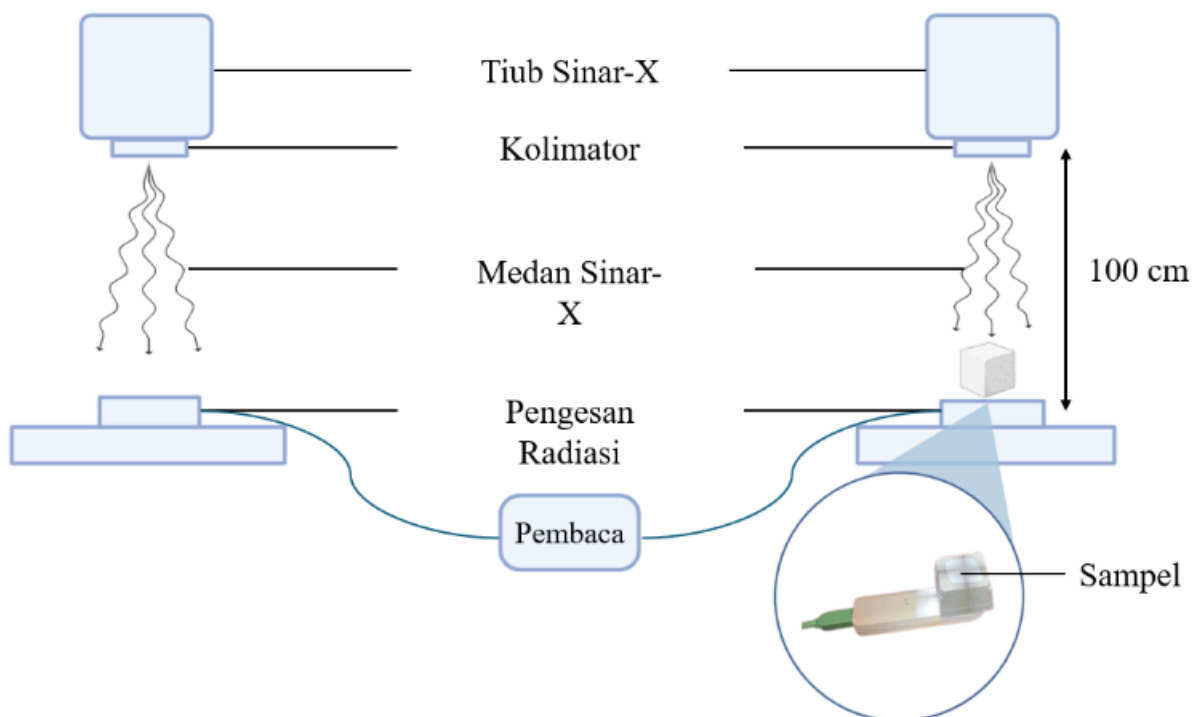
Analisis morfologi menggunakan FESEM dalam Rajah 3 menunjukkan perbezaan ketara antara kelima-lima bahan. Simen menunjukkan zarah bersegi, tidak sekata dengan taburan saiz heterogen daripada halus sehingga kasar serta permukaan yang padat dan agak licin yang memberikan sifat saling kunci mekanikal yang baik dalam matriks konkrit. Sebaliknya, kedua-dua serbuk cangkerang (SKT dan SKK) mempunyai struktur berliang dan berlubang berasal daripada cangkerang semula jadi, manakala tanah liat bentonit menunjukkan lapisan nipis dan rata yang tersusun bertindih. Seterusnya, tanah liat kaolin pula terdiri daripada zarah kecil yang seragam. Ciri morfologi ini iaitu kekasaran simen, keliangan cangkerang dan struktur berlapis tanah liat menjadikan bahan ini sesuai sebagai agen pelengkap dalam aplikasi pembinaan.



RAJAH 1. Saiz acuan

JADUAL 1. Ketumpatan sampel

Sampel	Ketumpatan (g/cm <sup>3</sup> )
Simen	1.81
SKK	1.64
SKT	1.51
Tanah liat Bentonit	1.25
Tanah liat Kaolin	1.32



RAJAH 2. Penyediaan penyinaran sinar-X

Jadual 2 memaparkan komposisi unsur bagi setiap sampel. Simen didominasi oleh oksigen (48.46%), karbon (29.84%) dan kalsium (18.00%) dengan kehadiran minor silikon, magnesium dan sulfur yang menepati ciri simen konvensional, terutamanya kehadiran kalsium silikat hidrat (C-S-H) sebagai agen pengikat utama. Kandungan karbon yang tinggi pula berkemungkinan terhasil daripada penggunaan batu kapur dalam proses pengkarbonan. Bagi tanah liat, kaolin menunjukkan dominasi oksigen (52.99%), silikon (12.95%) dan aluminium (13.11%) yang selaras dengan mineral kaolinit, manakala bentonit mempamerkan profil berbeza dengan kandungan karbon sangat tinggi (41.02%) selain oksigen (44.15%) dan silikon (11.11%), menunjukkan kehadiran mineral montmorilonit yang kaya dengan bendasing organik atau karbonat.

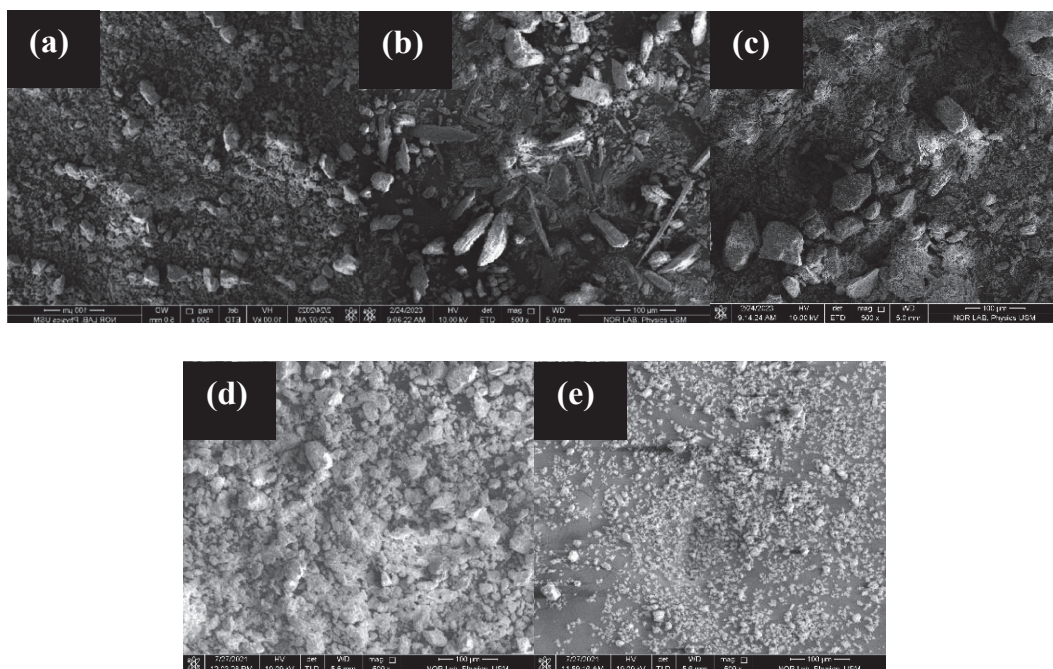
SKT dan SKK sebahagian besarnya terdiri daripada  $\text{CaCO}_3$  dengan dominasi unsur karbon, oksigen dan kalsium. SKT mengandungi 49.71% karbon, 39.14% oksigen dan 11.15% kalsium, manakala SKK pula terdiri daripada 32.60% karbon, 49.66% oksigen dan 17.74% kalsium. Perbezaan nisbah ini mencadangkan variasi dalam tahap ketulenan atau struktur hablur dengan SKK menunjukkan kandungan mineral  $\text{CaCO}_3$  yang lebih tinggi secara relatif dan kandungan bahan organik sisa yang lebih rendah berbanding SKT. Ini menjadikan SKK sebagai bahan yang lebih tulen untuk aplikasi yang memerlukan kalsium karbonat tinggi.

ANALISIS PELEMAHAN SINARAN

Kecekapan pelemahan sinaran bagi blok sampel yang mengandungi SKK, SKT, tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin telah dinilai dan dibandingkan dengan simen

konvensional menggunakan sinar-X pada tenaga 60, 80, 100 dan 120 kVp. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 4, simen secara tekal mempamerkan kecekapan perisai tertinggi yang dicerminkan oleh nilai RAR tertinggi pada semua aras tenaga. SKK menunjukkan prestasi yang setanding, dengan nilai RAR daripada  $96.5 \pm 0.2\%$  pada 60 kVp kepada  $84.2 \pm 0.1\%$  pada 120 kVp. Selain itu, perbezaannya berbanding simen adalah kecil, iaitu sekitar 1.6-2.3%, menandakan penurunan prestasi yang minimum. Sebaliknya, tanah liat kaolin menunjukkan pelemahan paling rendah pada semua aras tenaga dengan penurunan ketara kepada  $54.3 \pm 0.1\%$  pada 120 kVp. Secara keseluruhan, semua sampel menunjukkan penurunan RAR apabila tenaga sinar-X meningkat, selaras dengan kebarangkalian interaksi foton yang semakin berkurang pada tenaga yang lebih tinggi.

Kecekapan pelemahan juga secara umumnya menurun dengan pengurangan ketumpatan bahan. Pada 60 kVp, nilai RAR tertinggi direkodkan oleh simen, diikuti oleh SKK, SKT, tanah liat bentonit dan tanah liat kaolin. SKT dan bentonit menunjukkan prestasi yang hampir sama dengan perbezaan kecil sekitar 0.8%, menunjukkan keupayaan perisai yang setanding pada tenaga rendah. Pemerhatian ini dapat dijelaskan melalui mekanisme interaksi foton. Pada tenaga rendah (60 dan 80 kVp), kesan fotoelektrik mendominasi dan sangat bergantung pada nombor atom (Z). Oleh itu, prestasi lebih tinggi bagi simen dan SKK dikaitkan dengan nombor atom efektif ( $Z_{\text{eff}}$ ) dan ketumpatan yang lebih tinggi, terutamanya disebabkan oleh kandungan kalsium yang tinggi dalam kedua-dua simen dan  $\text{CaCO}_3$  yang terdapat dalam SKK.  $\text{CaCO}_3$  dikenali dengan keupayaannya menyerap sinar-X disebabkan oleh nombor atomnya yang tinggi dan seterusnya meningkatkan



RAJAH 3. Imej FESEM (a) Simen, (b) SKT, (c) SKK, (d) Tanah liat Bentonit dan (e) Tanah liat Kaolin

JADUAL 2. Komposisi unsur (%) bagi blok sampel

Unsur	Simen	Tanah liat Kaolin	Tanah liat Bentonit	SKT	SKK
C	29.84	20.95	41.02	49.71	32.60
O	48.46	52.99	44.15	39.14	49.66
Ca	18.00	-	-	11.15	17.74
Si	2.00	12.95	11.11	-	-
Al	-	13.11	3.13	-	-
Mg	0.90	-	0.59	-	-
S	0.80	-	-	-	-
Zr	-	-	-	-	-
K	-	-	-	-	-
Fe	-	-	-	-	-
Jumlah	100	100	100	100	100

kebarangkalian penyerapan fotoelektrik, iaitu mekanisme utama yang bertanggungjawab terhadap pelemahan sinaran (Gunjanaporn et al. 2024; Uzun, Genç & Acir 2023). Oleh sebab SKK mempunyai kandungan  $\text{CaCO}_3$  yang tinggi, maka ia sesuai digunakan sebagai bahan pelindungan sinaran.

Pada tenaga yang lebih tinggi (100 dan 120 kVp), serakan Compton menjadi mekanisme dominan. Interaksi ini bergantung terutamanya pada ketumpatan elektron dan sensitiviti yang berkurangan terhadap  $Z$  (Allisy-Roberts & Williams 2008; Redler et al. 2018). Hal ini sekali gus menjelaskan penurunan keseluruhan nilai RAR serta jurang prestasi yang semakin kecil antara simen dan SKK pada 120 kVp. Prestasi yang lebih rendah bagi SKT, bentonit dan khususnya kaolin adalah disebabkan oleh nilai  $Z_{\text{eff}}$  dan ketumpatan yang lebih rendah. Bahan-bahan ini kebanyakannya terdiri daripada aluminosilikat (Si, Al, O) yang kurang berkesan apabila berinteraksi dengan sinar-X. Penurunan ketara prestasi kaolin pada tenaga tinggi turut menunjukkan ketumpatan elektron yang tidak mencukupi untuk pelemahan yang berkesan. Secara keseluruhan, kedua-dua ketumpatan dan  $Z_{\text{eff}}$  memainkan peranan penting dalam prestasi perisai dengan pengaruhnya berubah mengikut julat tenaga. Keputusan ini mencerminkan potensi sisa biogen yang kaya kalsium seperti kulit kerang sebagai alternatif mampan kepada bahan perisai konvensional tanpa menjejaskan prestasi secara signifikan.

Pekali pelemahan linear ( $\mu$ ), menggambarkan kebarangkalian interaksi foton bagi setiap unit ketebalan bahan. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5, nilai  $\mu$  menurun apabila tenaga meningkat bagi semua sampel, selaras dengan pengurangan keratan rentas interaksi pada tenaga foton yang lebih tinggi. Simen menunjukkan nilai  $\mu$  tertinggi, iaitu daripada  $1.96 \pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$  pada 60 kVp kepada  $0.95 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$  pada 120 kVp. SKK menunjukkan nilai yang hampir setara, daripada  $1.67 \pm 0.02 \text{ cm}^{-1}$  kepada

$0.92 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$  dalam julat tenaga yang sama. Pada 120 kVp, perbezaan antara simen dan SKK hanyalah sekitar 3.2%, menunjukkan prestasi pelemahan yang setara pada tenaga sinar-X diagnostik.

Tanah liat kaolin merekodkan nilai  $\mu$  terendah pada semua aras tenaga, menurun daripada  $0.86 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$  pada 60 kVp kepada  $0.38 \pm 0.01 \text{ cm}^{-1}$  pada 120 kVp. SKT dan bentonit menunjukkan nilai pertengahan dengan bentonit lebih baik pada tenaga rendah oleh sebab ketumpatannya yang lebih tinggi. Keputusan ini mengesahkan bahawa ketumpatan dan  $Z_{\text{eff}}$  merupakan penentu utama pelemahan linear, khususnya pada tenaga rendah yang mana penyerapan fotoelektrik mendominasi.

Pekali pelemahan jisim ( $\mu/\rho$ ) menormalkan sifat pelemahan terhadap ketumpatan bahan, membolehkan perbandingan kecekapan intrinsik tanpa dipengaruhi oleh ketebalan. Seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 6, simen mencatatkan nilai  $\mu/\rho$  tertinggi iaitu  $1.07 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$  pada 60 kVp dan  $0.78 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$  pada 80 kVp. Walau bagaimanapun, pada 100 kVp, SKK mencapai nilai  $\mu/\rho$  sebanyak  $0.66 \pm 0.02 \text{ cm}^2/\text{g}$ , hampir sama dengan simen ( $0.66 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$ ). Pada 120 kVp, SKK mengatasi simen sebanyak 3.7% ( $0.55 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$  berbanding  $0.53 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$ ), menunjukkan kelebihan dari segi pelemahan berasaskan jisim pada tenaga tinggi, berkemungkinan disebabkan oleh komposisi unsur yang lebih baik. Tanah liat kaolin secara tekal menunjukkan nilai  $\mu/\rho$  terendah, antara  $0.65 \pm 0.01 \text{ cm}^2/\text{g}$  pada 60 kVp hingga  $0.31 \pm 0.02 \text{ cm}^2/\text{g}$  pada 120 kVp. Penumpuan nilai  $\mu/\rho$  antara simen dan SKK pada tenaga tinggi mencerminkan pengurangan pengaruh  $Z$  serta peningkatan peranan ketumpatan elektron dalam interaksi yang didominasi oleh serakan Compton.

Nilai HVL mewakili ketebalan bahan yang diperlukan untuk mengurangkan keamatan sinaran kepada separuh dengan nilai HVL yang lebih rendah menunjukkan kecekapan perisai yang lebih tinggi. Rajah 7 menunjukkan

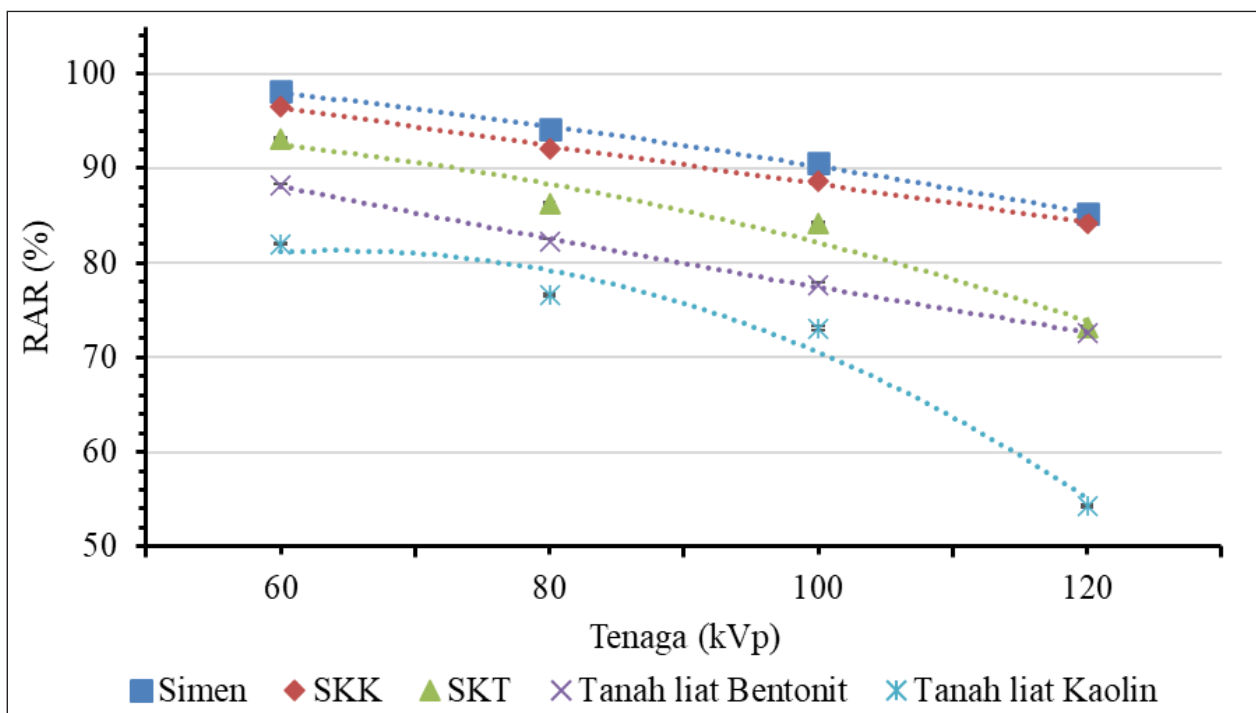
bahawa simen memerlukan ketebalan paling kecil untuk mencapai pelemahan 50% pada semua aras tenaga dengan nilai HVL meningkat daripada  $0.35 \pm 0.01$  cm pada 60 kVp kepada  $0.73 \pm 0.01$  cm pada 120 kVp. SKK menunjukkan nilai HVL yang sedikit lebih tinggi berbanding simen, namun perbezaannya sangat kecil, terutamanya pada 120 kVp ( $0.75 \pm 0.01$  cm berbanding  $0.73 \pm 0.01$  cm), iaitu hanya sekitar 2.8%.

Tanah liat kaolin memerlukan ketebalan paling besar untuk mencapai pelemahan 50% dengan nilai HVL meningkat ketara daripada  $0.82 \pm 0.01$  cm pada 60 kVp kepada  $1.75 \pm 0.02$  cm pada 120 kVp, mencerminkan prestasi yang lemah pada tenaga tinggi. SKT dan bentonit menunjukkan nilai HVL pertengahan dengan bentonit lebih baik pada tenaga rendah. Nilai HVL yang rendah bagi SKK, khususnya pada tenaga sinar-X yang lebih tinggi, mengesahkan potensinya sebagai alternatif mampan kepada simen konvensional dalam aplikasi perisai sinaran yang mempunyai kekangan ketebalan.

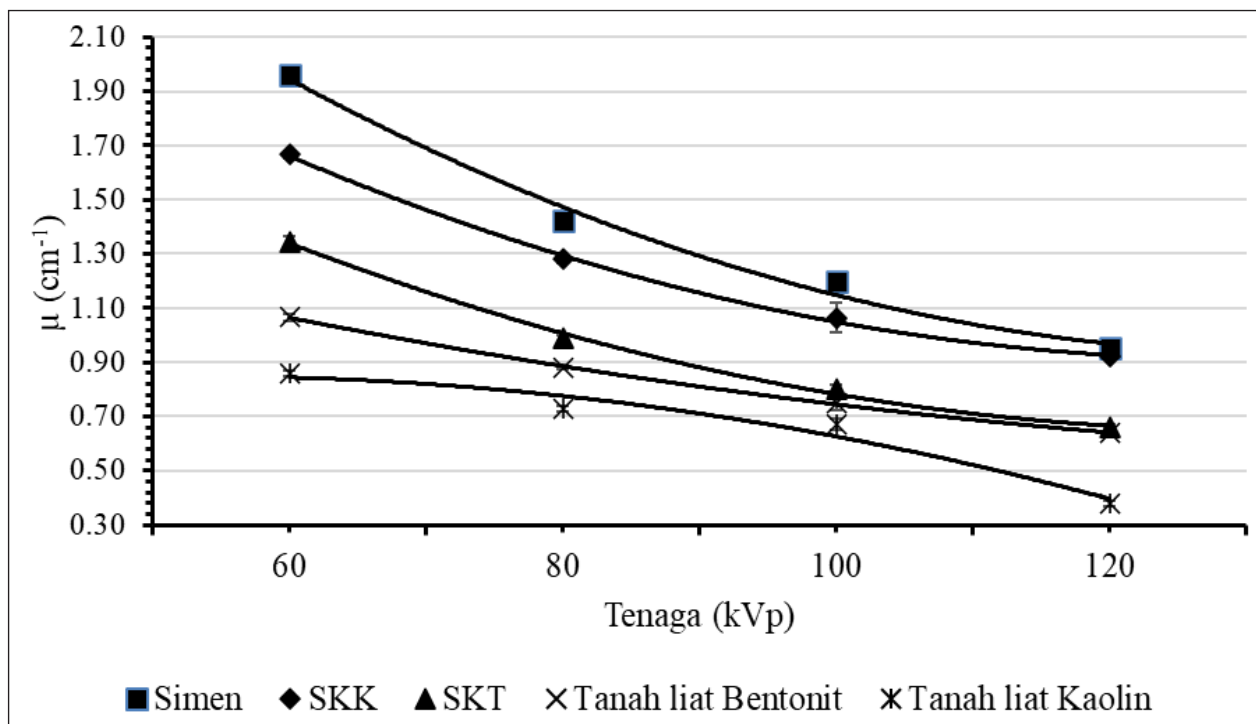
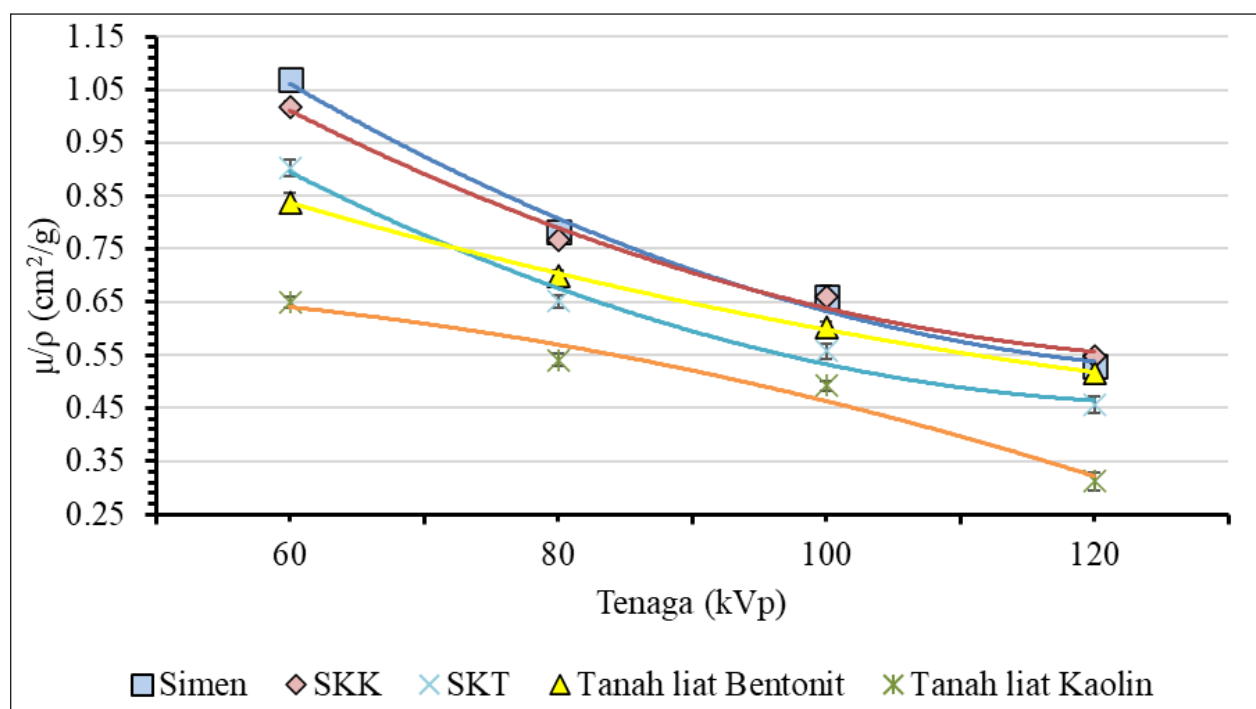
Seterusnya, analisis ANOVA (Rajah 8) dua hala telah dijalankan untuk menilai kesan jenis bahan dan tenaga sinar-X (kVp) terhadap RAR. Kedua-dua kesan utama didapati signifikan secara statistik, iaitu jenis bahan [ $F(4, 40) = 23,293.06, p < .001, \eta^2 = 1.000$ ] dan aras tenaga [ $F(3, 40) = 23,485.64, p < .001, \eta^2 = .999$ ], begitu juga

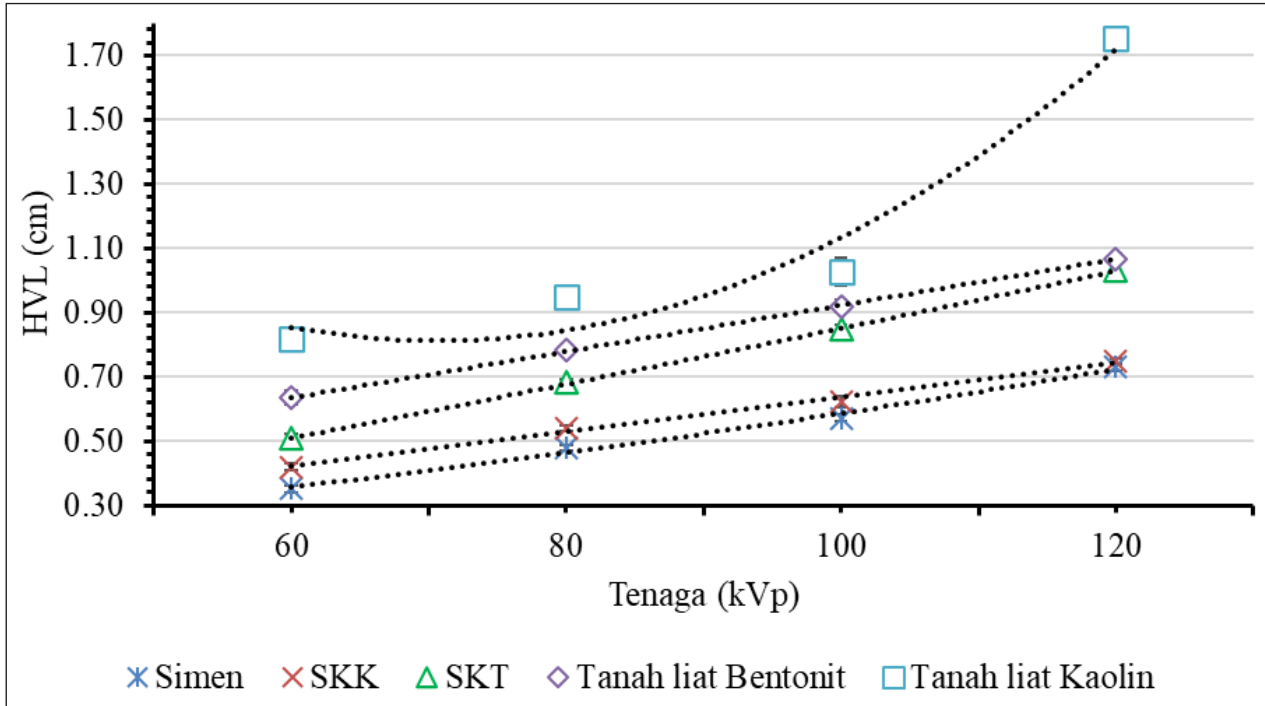
dengan kesan interaksi antara kedua-duanya [ $F(12, 40) = 819.08, p < .001, \eta^2 = .996$ ]. Perbandingan pasca hoc menggunakan ujian HSD Tukey menunjukkan bahawa semua perbezaan berpasangan antara bahan adalah signifikan secara statistik ( $p < .001$ ). Simen menunjukkan purata RAR tertinggi ( $M = 91.99$ ), diikuti oleh serbuk kulit kerang ( $M = 90.37$ ), serbuk kulit tiram ( $M = 84.22$ ), tanah liat bentonit ( $M = 80.20$ ) dan tanah liat kaolin ( $M = 71.51$ ).

Walaupun SKK menunjukkan prestasi pelemahan sinaran setanding dengan simen, struktur berliangnya (ketumpatan  $1.64 \text{ g/cm}^3$  vs simen  $1.81 \text{ g/cm}^3$ ) mengehadkan kekuatan mekanikalnya. Kajian lepas melaporkan bahawa bahan berasaskan kulit kerang tanpa pengikat tambahan mempunyai kekuatan mampatan sekitar 2-5 MPa, jauh lebih rendah berbanding simen Portland biasa yang mencapai 20-40 MPa (Hanis Nadiyah et al. 2021; Kim et al. 2025). Oleh itu, SKK tidak sesuai dijadikan sebagai pengganti langsung simen dalam aplikasi struktur gelas beban. Sebaliknya, SKK lebih praktikal digunakan dalam tiga senario: (i) lapisan pelapis pada dinding konkrit sedia ada, (ii) bahan pengisi dalam komposit hibrid bersama resin epoksi atau simen dan (iii) perisai bukan struktur seperti bekas sisa radioaktif atau penghadang mudah alih. Tanah liat bentonit dan kaolin, meskipun murah, kurang sesuai untuk perisai utama kerana prestasi pelemahannya yang lemah pada tenaga tinggi.

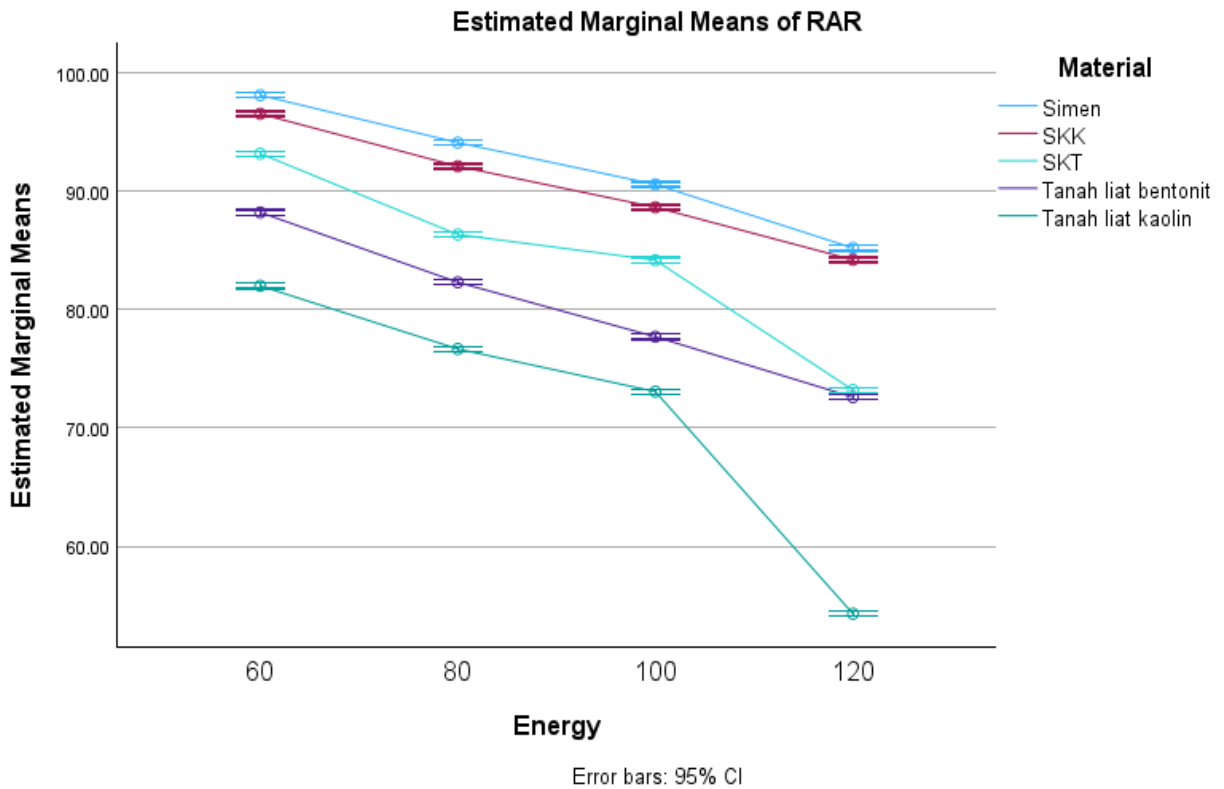


RAJAH 4. Nilai RAR (%) sampel pada 60 sehingga 120 kVp

RAJAH 5. Nilai  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) sampel pada 60 sehingga 120 kVpRAJAH 6. Nilai  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) sampel pada 60 sehingga 120 kVp



RAJAH 7. Nilai HVL (cm) sampel pada 60 sehingga 120 kVp



RAJAH 8. Penganggaran min marginal RAR sampel merentas aras tenaga

## KESIMPULAN

Secara keseluruhannya, kajian ini menunjukkan bahawa simen konvensional mempamerkan kecekapan pelemahan sinaran tertinggi pada semua aras tenaga (60-120 kVp), diikuti oleh SKK yang menunjukkan prestasi setanding dengan perbezaan yang sangat kecil, iaitu sekitar 1.6-2.3% untuk nilai RAR dan hanya 2.8% untuk nilai HVL pada tenaga 120 kVp. Analisis statistik ANOVA dua hala mengesahkan bahawa kedua-dua faktor jenis bahan dan aras tenaga memberi kesan signifikan ( $p < 0.001$ ) terhadap keupayaan perisai dengan ujian post hoc Tukey menunjukkan semua pasangan bahan berbeza secara signifikan. Prestasi unggul simen dan SKK dikaitkan dengan  $Z_{\text{eff}}$  dan ketumpatan yang tinggi, terutamanya daripada kandungan kalsium dalam simen dan  $\text{CaCO}_3$  dalam kulit kerang. Sebaliknya, tanah liat kaolin merekodkan prestasi pelemahan paling rendah, terutamanya pada tenaga tinggi (RAR: 54.3% pada 120 kVp), disebabkan oleh ketumpatan elektron yang tidak mencukupi. Menariknya, dari sudut  $\mu/\rho$ , SKK mengatasi simen sebanyak 3.7% pada 120 kVp, menunjukkan kelebihan intrinsik bahan berasaskan cangkerang pada tenaga diagnostik yang lebih tinggi.

Nilai HVL yang rendah bagi SKK (0.75 cm pada 120 kVp) mengesahkan potensinya sebagai alternatif mampan kepada simen dalam aplikasi perisai sinaran yang mempunyai kekangan ketebalan, terutamanya apabila prestasi hampir setara dengan simen pada tenaga tinggi. Oleh itu, sisa biogen seperti kulit kerang berpotensi besar sebagai bahan perisai sinaran yang mesra alam dan kos efektif tanpa menjejaskan prestasi secara signifikan. Untuk aplikasi praktikal, SKK disarankan sebagai lapisan pelapis, pengisi komposit atau perisai mudah alih, bukannya pengganti langsung simen dalam struktur galas beban. Kajian lanjut mengenai kekuatan mampatan dan kebolehpasaran diperlukan sebelum penggunaan berskala besar.

## PENGHARGAAN

Kajian ini dibiayai oleh Geran Penyelidikan Individu (RUI-Khas) tahun 2024 di bawah Universiti Sains Malaysia dengan kod projek R502-KR-ARU001-0000001143-K134.

## PERNYATAAN PENGGUNAAN TEKNOLOGI AI GENERATIF DAN AI BANTUAN DALAM PROSES PENULISAN

Sepanjang penyediaan makalah ini, kami telah menggunakan ChatGPT dan DeepSeek untuk meningkatkan aspek tatabahasa dan struktur ayat. Setelah menggunakan peralatan/perkhidmatan ini, kami telah menyemak dan menyunting kandungan yang diperlukan serta memikul tanggungjawab penuh ke atas kandungan penerbitan ini.

## RUJUKAN

- Abdul-Majid, S., Kinsara, A., Almasoumi, A. & Kalliothy, M. 2006. Reduction of backscattered radiation in enclosure x-ray radiography. *Middle East Nondestructive Testing Conference & Exhibition*, 27-30 Nov 2005, Bahrain, Manama. <https://www.ndt.net/search/docs.php3?id=3303>
- Ali, M.B., Saidur, R. & Hossain, M.S. 2011. A review on emission analysis in cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(5): 2252-2261. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.014>
- Allisy-Roberts, P. & Williams, J. 2008. Radiation physics. *Farr's Physics for Medical Imaging* (2nd ed.). Elsevier eBooks. hlm. 1-21. <https://doi.org/10.1016/b978-0-7020-2844-1.50005-3>
- Aral, N., Banu Nergis, F. & Candan, C. 2015. An alternative x-ray shielding material based on coated textiles. *Textile Research Journal* 86(8): 803-811. <https://doi.org/10.1177/0040517515590409>
- Collin, M.S., Venkatraman, S.K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S.M., Sibiyi Stacey, R.G., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G.I., Senatov, F., Koppala, S. & Swamiappan, S. 2022. Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. *Journal of Hazardous Materials Advances* 7: 100094. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Ephraim, M.E., ThankGod, O. & Gbinu, K.S. 2019. Performance of high strength concrete using oyster shell ash as partial replacement for cement. *SSRG International Journal of Civil Engineering* 6(6): 33-38. <https://doi.org/10.14463/3483832/LICS-WRP107>
- Griffey, R.T. 2016. Ionizing radiation. *Oncologic Emergency Medicine: Principles and Practice*. Springer International Publishing. hlm. 107-117. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-26387-8\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-26387-8_8)
- Gunjanaporn Tochaikul, Nuttapol Tanadchangsang, Anuchan Panaksri & Nutthapong Moonkum. 2024. Innovative radiation shielding material with flexible lightweight and low cost from shrimp shells waste. *Radiation Physics and Chemistry* 225: 112162. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112162>
- Han, B., Zhang, L. & Ou, J. 2017. *Smart and Multifunctional Concrete Toward Sustainable Infrastructures*. Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-4349-9>
- Hanan Al-Ghamdi, Hanaa M. Hemily, I.H. Saleh, Z.F. Ghataas, A.A. Abdel-Halim, M.I. Sayyed, Sabina Yasmin, Aljawhara H. Almuqrin & Mohamed Elsafi. 2022. Impact of  $\text{WO}_3$ -nanoparticles on silicone rubber for radiation protection efficiency. *Materials* 15(16): 5706. <https://doi.org/10.3390/ma15165706>
- Hanis Nadiah Ruslan, Khairunisa Muthusamy, Sharifah Maszura Syed Mohsin, Rajan Jose & Roslina Omar. 2021. Oyster shell waste as a concrete ingredient: A review. *Materials Today Proceedings* 48: 713-719. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.208>

- Kim, J., Cha, I., Jo, B. & Lee, H. 2025. Evaluation of compressive strength of eco-friendly cementitious composites incorporating waste oyster shells under sodium chloride solution exposure. *Case Studies in Construction Materials* 23: e04944. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04944>
- Kuo, W-T., Wang, H-Y., Shu, C-Y. & Su, D-S. 2013. Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells. *Construction and Building Materials* 46: 128-133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.04.020>
- Little, J.B. 2003. Genomic instability and bystander effects: A historical perspective. *Oncogene* 22(45): 6978-6987. <https://doi.org/10.1038/sj.onc.1206988>
- Luby, S.P., Forsyth, J.E., Fatmi, Z., Rahman, M., Sultana, J., Plambeck, E.L., Miller, N.G., Bendavid, E., Winch, P.J., Hu, H., Lanphear, B. & Landrigan, P.J. 2024. Removing lead from the global economy. *The Lancet Planetary Health* 8(11): E966-E972. [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(24\)00244-4](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(24)00244-4)
- Mahmoud I. Abbas, Ahmed M. El-Khatib, Mirvat Fawzi Dib, Hoda Ezzeldin Mustafa, M.I. Sayyed & Mohamed Elsafi. 2022. The influence of Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle content on the  $\gamma$ -ray interaction parameters of silicon rubber. *Polymers* 14(5): 1048. <https://doi.org/10.3390/polym14051048>
- Maryam Muhammad Mailafiya, Kabeer Abubakar, Abubakar Danmaigoro, Samaila Musa Chiroma, Ezamin Bin Abdul Rahim, Mohamad Aris Mohd Moklas & Zuki Abu Bakar Zakaria. 2019. Cockle shell-derived calcium carbonate (aragonite) nanoparticles: A dynamite to nanomedicine. *Applied Sciences* 9(14): 2897. <https://doi.org/10.3390/app9142897>
- Mohamed Elsafi, Yousry Koraim, Mansour Almurayshid, Fahad I Almasoud, M.I. Sayyed & I.H. Saleh. 2021. Investigation of photon radiation attenuation capability of different clay materials. *Materials* 14(21): 6702. <https://doi.org/10.3390/ma14216702>
- Muhd Afiq Hizami Abdullah, Raizal Saifulnaz Muhammad Rashid, Mugahed Amran, Farzad Hejazii, N.M. Azreen, Roman Fediuk, Yen Lei Voo, Nikolai Ivanovich Vatin & Mohd Idzat Idris. 2022. Recent trends in advanced radiation shielding concrete for construction of facilities: Materials and properties. *Polymers* 14(14): 2830. <https://doi.org/10.3390/polym14142830>
- Nabilla Mohamad, Khairunisa Muthusamy, Rahimah Embong, Andri Kusbiantoro & Mohd Hanafi Hashim. 2021. Environmental impact of cement production and solutions: A review. *Materials Today Proceedings* 48: 741-746. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
- Nur Miza Osman, Suffian Mohamad Tajudin, Adila Hanim Aminordin Sabri, Arif Faddilah Mohd Noor & Mohd Zahri Abdul Aziz. 2022. Evaluation of scattering effects for radiation shielding or filter materials by using Monte Carlo simulation. *IOP Conference Series Materials Science and Engineering* 1231(1): 012007. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1231/1/012007>
- Nur Zahidah Jasmine Jamaluddin, Mo'men Mohammad Bani-Ahmad, Nurul Zahirah Noor Azman & Ramzun Maizan Ramli. 2024. Eggshell-enhanced composites: Innovative radiation shielding materials for diagnostic x-ray applications. *Radiation Physics and Chemistry* 224: 112076. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.112076>
- Redler, G., Jones, K.C., Templeton, A., Bernard, D., Turian, J. & Chu, J.C.H. 2018. Compton scatter imaging: A promising modality for image guidance in lung stereotactic body radiation therapy. *Medical Physics* 45(3): 1233-1240. <https://doi.org/10.1002/mp.12755>
- Shen, W., Cao, L., Li, Q., Zhang, W., Wang, G. & Li, C. 2015. Quantifying CO<sub>2</sub> emissions from China's cement industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50: 1004-1012. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.031>
- Uzun, S., Genç, Y. & Acir, A. 2023. Investigation of the use of calcium carbonate as nanoparticles in nuclear reactors. *Konya Journal of Engineering Sciences* 11(1): 1-19. <https://doi.org/10.36306/konjes.1139083>
- Varhen, C., Carrillo, S. & Ruiz, G. 2017. Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 136: 533-540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067>
- Wesam Abdullah, Ramzun M. Ramli, Thair Hussein Khazaalah, Nurul Zahirah Noor Azman, Tasnim M. Nawafleh & Farah Salem. 2024. Enhancing x-ray radiation protection with novel liquid silicone rubber composites: A promising alternative to lead aprons. *Nuclear Engineering and Technology* 56(9): 3608-3615. <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.04.012>
- Yu, Y-L., Yang, W-Y., Hara, A., Asayama, K., Roels, H.A., Nawrot, T.S. & Staessen, J.A. 2023. Public and occupational health risks related to lead exposure updated according to present-day blood lead levels. *Hypertension Research* 46(2): 395-407. <https://doi.org/10.1038/s41440-022-01069-x>

\*Pengarang untuk surat-menyurat; email: ramzun@usm.my