

## Kesan Integriti Pemeriksaan Sinaran Seramik Mullite-Barite (MBC) terhadap Kejadian Kebakaran (Radiation Shielding Integrity of Mullite-Barite Ceramic (MBC) due to Fire Events)

AZUHAR RIPIN, FAIZAL MOHAMED\*, MOHD IDZAT IDRIS & NUR SYAFIKA SUHAIMIN

### ABSTRACT

*Mullite-barite ceramic (MBC) prototype which contains a major phase of barium aluminosilicate (BAS) mineral is an anti-radiation ceramics which is derived from Malaysian kaolin Akima-35 and local barites using conventional ceramics processing route. MBC is a low cost and high performance ceramics which resistance to fire events are fabricated and characterised according to their microstructure properties and radiation test to ensure the shielding capability of the ceramics. The MBC will be used as shielding materials for walls, floor and ceiling of medical x-ray radiation facilities in clinics, medical centers and hospitals. The prepared MBC was undergoing microstructure analysis using X-ray diffraction (XRD) and Scanning Field Electron Microscope (FESEM) to see the phase and morphological of the ceramics. Lead equivalent (LE) and homogeneity test was carried out to evaluate the shielding performance of the MBC before the ceramics are fired with different building fire temperature. The temperature used to simulate the fire events are 400, 900, and 1100°C which is burnt in the high temperature electrical furnace. The fired MBC once again underwent XRD and FESEM to see any changes in the phase and morphology. The lead equivalent and homogeneity test also repeated to see the changes in the shielding performance. From the study, the microstructure analysis from XRD and FESEM obtained shows no significant changes of Monoclinic Barium Aluminosilicate (BAS), which are the major shielding phase in the ceramics before and after fire events. The lead equivalent test and homogeneity also remains the same before and after fire events with the maximum LE calculated are 0.38 mm Pb and 3.6% of homogeneity. From the study, it can be concluded that if the fire event occurred in the radiation facilities, the shielding performance and integrity of the shielding will be remained and the temperature will not degraded the shielding capabilities of the ceramics as do happen for a conventional shielding material.*

*Keywords: Lead equivalent thickness; medical X-ray; mullite-barite ceramics (MBC); radiation shielding*

### ABSTRAK

*Prototip seramik mullite barite (MBC) yang mengandungi fasa utama mineral barium aluminosilikat (BAS) merupakan seramik anti-sinaran yang dihasilkan daripada kaolin Malaysia akima-35 dan serbuk barite tempatan melalui kaedah pemprosesan seramik konvensional. MBC akan digunakan sebagai bahan perlindungan sinaran untuk dinding, lantai dan juga siling bagi kemudahan sinar-X perubatan di klinik, pusat perubatan dan juga hospital. MBC yang disediakan akan menjalani analisis struktur mikro menggunakan teknik serakan sinar-X (XRD) dan mikroskop imbasan medan elektron (FESEM) terutamanya bagi penentuan fasa serta morfologi seramik yang terhasil. Ujian ketebalan kesetaraan plumbum (LE) dan keseragaman dijalankan bagi menilai prestasi pemeriksaan MBC sebelum dan selepas dibakar. Suhu simulasi kebakaran bangunan yang digunakan adalah 400, 900 dan 1100°C yang dibakar di dalam relau elektrik bersuhu tinggi. MBC yang dibakar ini akan sekali lagi melalui ujian XRD dan FESEM bagi melihat sebarang perubahan fasa dan morfologi sampel seramik tersebut. Ujian ketebalan kesetaraan plumbum dan keseragaman sekali lagi ditentukan bagi melihat perubahan prestasi pemeriksaan. Daripada analisis struktur mikro menerusi XRD dan FESEM didapati tiada perubahan fasa Barium Aluminosilikat (BAS) yang signifikan berlaku bagi seramik sebelum dan selepas kebakaran. Keputusan ujian ketebalan kesetaraan plumbum dan keseragaman juga tetap sama direkodkan bagi MBC sebelum dan selepas kebakaran berlaku dengan ketebalan maksimumnya adalah 0.38 mmPb dan 3.6% keseragaman direkodkan. Daripada kajian ini dapat disimpulkan bahawa jika berlakunya kebakaran pada kemudahan penyinaran, prestasi pemeriksaan dan keseragaman MBC dijangka tidak berubah seperti yang berlaku pada bahan perlindungan konvensional.*

*Kata kunci: Ketebalan kesetaraan plumbum; perisai perlindungan sinaran; seramik mullite-barite (MBC); sinar-X perubatan*

### PENGENALAN

Bahan perlindungan sinaran yang biasa digunakan pada kemudahan mesin sinar-X perubatan adalah didominasi

oleh penggunaan kepingan plumbum, konkrit dan plaster sinar-X. Penggunaan konkrit dan plaster sinar-X digunakan pada bahagian dinding bilik sinaran, manakala

pada bahagian pintu pula biasanya kepingan plumbum akan digunakan disebabkan oleh faktor kos yang tinggi jika digunakan pada keseluruhan bahagian dinding bilik sinaran. Harga pasaran dunia yang tinggi bagi plumbum sekitar USD 2400 satu tan metrik menyebabkan keperluan kepada perisai perlindungan sinaran alternatif yang lebih murah dan efisien diperlukan (Infomine 2017). Selain daripada faktor harga bahan mentah bagi perisai perlindungan sinaran, faktor ketahanan pemerisaian bahan sinaran jika berlakunya bencana alam juga merupakan faktor penting yang perlu diambil kira bagi membangunkan perisai perlindungan sinar-X yang baru. Salah satu bencana alam yang paling kerap berlaku di Malaysia adalah kebakaran bangunan. Kadar kebakaran bangunan yang tinggi dengan purata 33,640 kes pada tahun 2013 yang melibatkan seramai 70 kematian dan 165 kecederaan dengan kerugian yang dianggarkan sebanyak 2 billion ringgit yang berlaku pada tahun tersebut sahaja (Rahim 2015). Berdasarkan kepada pecahan statistic, 90% kebakaran adalah berpunca daripada kecuaiian manusia dan melibatkan bangunan seperti rumah kediaman, bangunan pejabat, kedai, bengkel, stor, sekolah, bangunan awam serta kilang (Utusan 1998). Kebakaran bangunan akan menyebabkan prestasi pemerisaian bagi kemudahan sinaran akan merosot kerana integriti dinding, lantai dan pintu bilik sinaran juga akan menurun disebabkan kerosakan pada bahagian tersebut. Kerosakan utama datangnya daripada rekahan yang terhasil daripada regangan dan penghidratan haba kesan daripada kebakaran. Prestasi pemerisaian akan terkesan dan menurun mengikut rekahan saiz geometri (lebar, dalam dan lengkungan) dan kadar dos pada permukaan luar kemudahan sinaran akan meningkat secara logaritma selari dengan peningkatan saiz rekahan (Keshk et al. 2012). Berdasarkan kepada kajian terdahulu, kesan pendedahan jangka panjang kepada suhu tinggi menunjukkan kekuatan mampatan konkrit akan berkurang. Kekuatan mampatan akan berkurang pada suhu 540°C. Bagi konkrit konvensional, pendedahan jangka panjang kepada suhu tinggi boleh menyebabkan perubahan dalam kekuatan mampatan, modulus keanjalan, rintangan rayapan, kekonduksian, kekenyalan dan pengembangan (Kodur 2014). Secara umumnya, ambang pengurangan dalam konkrit akan berlaku pada suhu 95°C. Kesan jelas perubahan suhu pada konkrit adalah pada kekuatan regangan dengan peningkatan suhu daripada 20°C kepada 100°C boleh mengurangkan 50% daripada kekuatan tensil sesuatu konkrit (Filmore 2004).

Bagi mengatasi masalah ini, buat pertama kalinya perisai sinaran berasaskan seramik mullite-barite (MBC) dihasilkan melalui komposisi terbaik kaolin Malaysia AKIMA 35 sebagai asas pembentukan mullite dan barite sebagai penguat kepada struktur seramik anti sinaran. Seramik yang terhasil telah berjaya meningkatkan keupayaan pemerisaian dos sinaran sehingga 97.42% dan boleh digunakan sebagai perisai sinaran untuk kemudahan sinar-X perubatan (Ripin et al. 2018). Di samping keupayaan pemerisaian MBC terhadap sinar-X dalam julat diagnostik, prestasi MBC terhadap suhu

kebakaran juga dikaji dalam kertas ini melalui simulasi kebakaran dengan suhu yang berbeza. Berdasarkan kepada keputusan yang diperolehi, integriti pemerisaian serta struktur mikro sebelum dan selepas masih mengekalkan prestasi yang sama walaupun berlakunya kebakaran. Atas faktor ini, perisai sinaran tempatan MBC ini amat sesuai digunakan sebagai perisai bagi bilik sinaran serta mampu mengekalkan prestasi pemerisaian walaupun berlakunya bencana alam seperti kebakaran bangunan.

## BAHAN DAN KAEDAH UJI KAJI

### PENGHASILAN PROTOTAIP SERAMIK MULLITE BARITE

Seramik mullite barite (MBC) dihasilkan dengan menggunakan kaedah penghasilan seramik konvensional iaitu melalui proses pengeringan, penghancuran, percampuran serbuk, pemampatan dan proses pembakaran. Proses pengeringan serbuk kaolin Akima-35 dan barite dijalankan dengan menggunakan ketuhar elektrik *Carbolite* dengan suhu 105°C selama 8 jam sehari dan mengambil masa selama 3 hari bagi memastikan kelembapan pada kedua-dua serbuk tadi hilang sepenuhnya. Kemudian serbuk ini akan dicampurkan mengikut peratusan 60% serbuk kaolin dan 40% serbuk barite berdasarkan berat campuran serbuk tadi akan dikisar dan dihancurkan menggunakan pengisar bebola *Pulverisssate Planetary* selama 30 min dengan kelajuan 300 rpm. Bebola yang digunakan untuk mengisar serbuk tersebut adalah daripada jenis tungsten karbid sebanyak 8 biji bebola. Serbuk yang siap dikisar seterusnya dibakar dengan menggunakan relau elektrik bersuhu tinggi *Nabertherm* dengan menggunakan suhu 400°C dan ditetapkan selama 30 min dan seterusnya suhu maksimum 1300°C pula dikenakan selama 2 jam dan dibiarkan sejuk pada suhu bilik semalaman. Proses penghasilan seramik mullite barite secara terperinci diterangkan dalam artikel '*X-ray shielding behaviour of kaolin derived mullite-barites ceramic*' (Ripin et al. 2018).

Prototaip MBC akan menjalani proses pencirian seterusnya iaitu pencirian struktur mikro dengan menggunakan mesin serakan sinar-X (XRD) dan mikroskop imbasan medan elektron (FESEM). Pencirian seterusnya adalah pencirian kesan sinaran yang melibatkan ujian ketebalan kesetaraan plumbum (LE) dan keseragaman.

### UJIAN STRUKTUR MIKRO PROTOTAIP MBC

Pembentukan fasa MBC ditentukan dengan menggunakan mesin serakan sinar-X (XRD) *Bruker AXS D8 Advance* dan morfologi permukaan seramik ditentukan dengan menggunakan FESEM, *Zeiss GeminiSEM 500* dengan sudut 17° hingga 70°. Pengiraan peratusan pembentukan fasa pula akan ditentukan menggunakan *X'PertHighScore Plus*. Ujian struktur mikro juga diulang bagi sampel MBC yang akan dibakar pada suhu 400°C, 900°C dan 1100°C bagi melihat perubahan fasa dan morfologi apabila berlakunya kebakaran.

#### UJIAN KETEBALAN KESETARAAN PLUMBUM DAN KESERAGAMAN (LE)

Pengukuran ketebalan kesetaraan plumbum (LE) dijalankan dengan membandingkan ketebalan kepingan plumbum berketulenan tinggi 99.9% dengan sampel MBC yang telah disediakan. Pengukuran dilakukan berdasarkan IEC61331-1:2014 dengan menggunakan alur sinar-X kualiti perubatan daripada mesin sinar-X Am Toshiba-KXO50s. Hukum pengecilan sinaran digunakan bagi menghasilkan lengkung kalibrasi piawaian bagi plumbum berketulenan tinggi tersebut (Buermann et al. 2016).

Bagi menentukan keseragaman sampel MBC, dos pengecilan sinaran pada lima posisi berlainan pada setiap sampel akan diambil dan nilai pekali perubahan (COV) atau ralat piawaian akan dihitung bagi melihat perbezaan nilai pengecilan pada posisi yang berlainan dalam peratusan.

Pengiraan ketebalan kesetaraan plumbum (LE) dan keseragaman ini akan dihitung bagi sampel sebelum dan selepas ujian kebakaran untuk melihat perubahan prestasi pemeriksaan sampel tersebut.

#### PEMBAKARAN SAMPEL MBC TERHADAP SUHU KEBAKARAN BANGUNAN BERBEZA

Sebanyak empat set sampel yang dinomborkan sebagai F1, F2, F3 dan F4 dibakar pada suhu kebakaran berbeza seperti pada Jadual 1.

JADUAL 1. Suhu pembakaran bagi sampel F1, F2, F3 dan F4 bagi ujian kebakaran

Bil.	Sampel MBC	Suhu dibakar (°C)
1	F1	0 (tiada pembakaran)
2	F2	400
3	F3	900
4	F4	1100

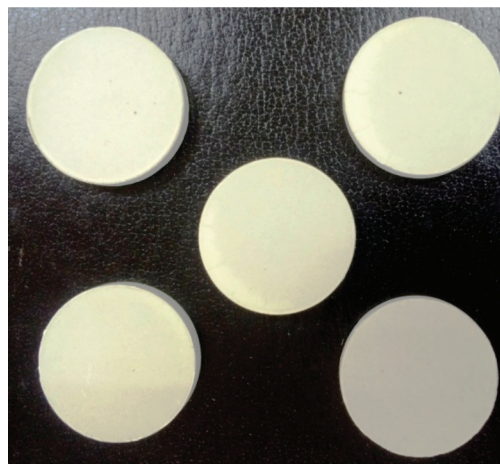
Pembakaran telah dilakukan di dalam relau Muffle 1700°C Model BSK-1700X-M selama empat jam. Sampel MBC yang siap dibakar ini akan sekali lagi melalui ujian XRD, SEM dan ujian ketebalan kesetaraan plumbum dan keseragaman.

#### KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN

##### SERAMIK MULLITE BARITE (MBC)

Proses penghasilan seramik secara konvensional yang digunakan ini telah berjaya menghasilkan seramik putih berbentuk cakera yang mempunyai permukaan licin berdiameter 4 cm dan berketebalan 0.5 cm seperti dalam Rajah 1.

Berdasarkan kepada ujian XRD, didapati fasa tunggal yang terbentuk pada struktur mikro seramik mullite barite adalah fasa *celsian* yang juga dikenali sebagai fasa monoklinik barium aluminosilikat (BAS). Kesemua sampel yang terhasil menghasilkan fasa BAS seperti



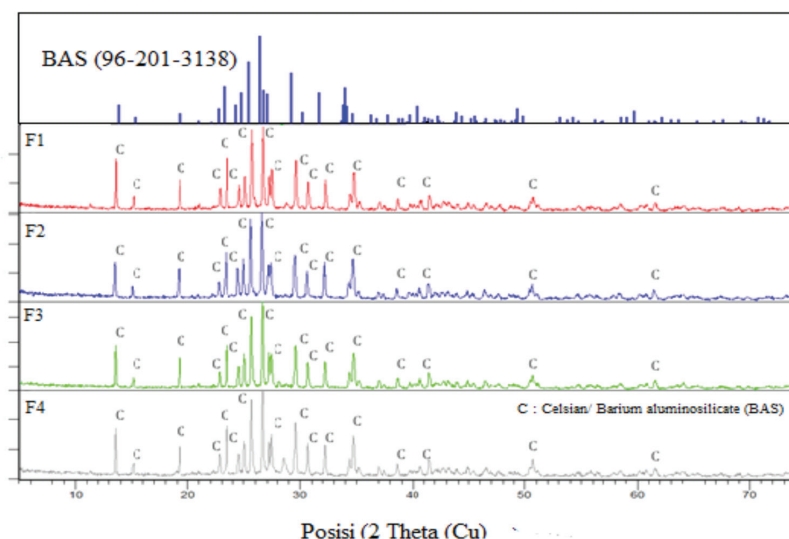
RAJAH 1. Seramik mullite barite (MBC) yang dihasilkan melalui kaedah pemprosesan seramik konvensional

yang telah dijangka. Saiz pengkristalan yang besar jelas kelihatan pada spektrum yang terhasil.

Manakala bagi sampel MBC yang ditandakan sebagai F1, F2, F3 dan F4, fasa tunggal *celsian* terbentuk pada kesemua sampel seramik yang melalui proses pembakaran dan yang tidak melalui proses pembakaran. Tiada perubahan daripada segi fasa pengkristalan yang dicerap oleh pembelauan sinar-X (XRD) untuk sampel seramik tersebut. Rajah 2 merupakan kombinasi spektrum yang diperolehi melalui teknik XRD untuk sampel seramik F1, F2, F3 dan F4.

BAS banyak digunakan sebagai bahan reflektori disebabkan oleh ketahanannya kepada suhu tinggi dengan suhu penggunaan BAS adalah 1590°C dan takat lebur bagi BAS adalah 1760°C. Menurut Bansal et al. (2003), jika suhu di bawah takat lebur dikenakan kepada sesuatu bahan yang mempunyai fasa tunggal monoklinik BAS, maka tiada perubahan fasa akan berlaku kepada sesuatu bahan tersebut.

Analisis menggunakan Rietveld pula menunjukkan sedikit perubahan pada ketegangan mikro, saiz pengkristalan dan juga anggaran ketumpatan seperti yang ditunjukkan pada Jadual 2. Perbezaan nilai ketegangan mikro yang berlaku untuk setiap sampel MBC yang mengalami simulasi kebakaran adalah sangat rendah dan hampir sama iaitu di bawah 0.1% menunjukkan bahawa tenaga daripada suhu kebakaran yang dikenakan kepada sampel tersebut tidak dapat mengubah bentuk struktur mikro bagi setiap sampel MBC dan ia juga disokong oleh tiadanya perubahan yang berlaku kepada sistem kristal dan juga saiz pengkristalan yang terhasil. Perkara ini disahkan oleh Drummond dengan BAS atau *celsian* ini akan berada dalam fasa stabil dan tidak berlaku sebarang perubahan pada fasa yang terbentuk jika suhu yang dikenakan adalah di bawah 1590°C. Selain daripada itu, nilai tegangan mikro juga tidak banyak berubah disebabkan oleh sifat *celsian* itu sendiri yang mempunyai nilai pekali pengembangan haba yang rendah iaitu  $2.29 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  (Drummond et al. 1990).



RAJAH 2. Profil XRD bagi sampel F1, F2, F3 dan F4 yang telah melalui proses pembakaran sehingga 1100°C

JADUAL 2. Nilai ketegangan mikro, saiz pengkristalan dan ketumpatan menggunakan ujian Rietveld bagi F1, F2, F3 dan F4

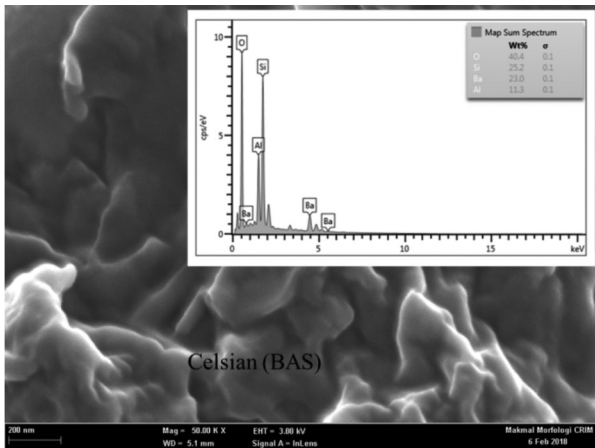
Bil.	Sampel	Sistem kristal	Ketegangan mikro (%)	Saiz pengkristalan (Å)	Ketumpatan (g/cm <sup>3</sup> )
1.	F1	Monoklinik Barium Aluminosilikat (BAS)	0.119	27913.400	3.23
2.	F2	Monoklinik Barium Aluminosilikat (BAS)	0.120	27913.400	3.23
3.	F3	Monoklinik Barium Aluminosilikat (BAS)	0.129	27913.400	3.15
4.	F4	Monoklinik Barium Aluminosilikat (BAS)	0.104	27913.400	3.15

Kehadiran fasa monoklinik barium aluminosilikat (BAS) pada setiap sampel F1-F4 disokong oleh imej morfologi yang didapati daripada teknik mikroskop imbasan medan elektron (FESEM). Kesemua imej yang diperolehi menunjukkan kehadiran kepingan barium aluminosilikat yang menjadi fasa utama dalam pemerisaian sinaran mengion. Ini disokong dengan spektrum EDX pada setiap Rajah 3(a)-3(d). Saiz pengkristalan yang besar serta padat yang mencapai sehingga 27913 Å merupakan fasa yang sangat bagus bagi pengecilan foton yang melalui seramik tersebut (Amritphale et al. 2007a, 2007b). Anggaran ketumpatan bagi seramik MBC ini juga agak tinggi iaitu sekitar 3.2 g/cm<sup>3</sup> dan ia lebih tinggi berbanding konkrit berketumpatan kategori berat iaitu 2.6 g/cm<sup>3</sup> yang banyak digunakan sebagai perisai pada kemudahan penyinaran. Seramik MBC ini boleh dikategorikan sebagai konkrit berketumpatan tinggi kerana mempunyai ketumpatan melebihi 3 g/cm<sup>3</sup> mengikut TS-EN 206-1 (2002) (Ouda 2015).

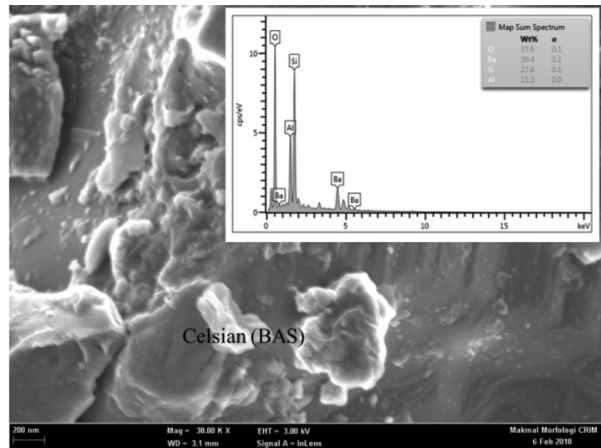
Ketebalan kesetaraan plumbum bagi setiap sampel MBC sebelum dan selepas kejadian kebakaran dihitung berdasarkan lengkungan kalibrasi piawaian pada Rajah 4 adalah seperti pada Rajah 5.

Berdasarkan kepada nilai ketebalan kesetaraan plumbum sampel seramik yang diukur di dalam makmal, julat nilai ketebalan kesetaraan plumbum adalah antara 0.25 - 0.37 mmPb bagi sampel MBC sebelum berlakunya simulasi kebakaran di dalam relau. Ketebalan maksimum yang direkodkan adalah pada 0.37 mmPb yang diukur pada keupayaan tiub sinar-X pada 90 kV. Manakala bagi sampel seramik yang dibakar di dalam relau pada suhu berbeza 400°C, 900°C dan 1100°C yang ditandakan sebagai F2-F4 nilai ketebalannya adalah pada julat 0.26 - 0.38 mmPb iaitu lebih tinggi sedikit yang dicerap berbanding ketebalan sebelum dibakar.

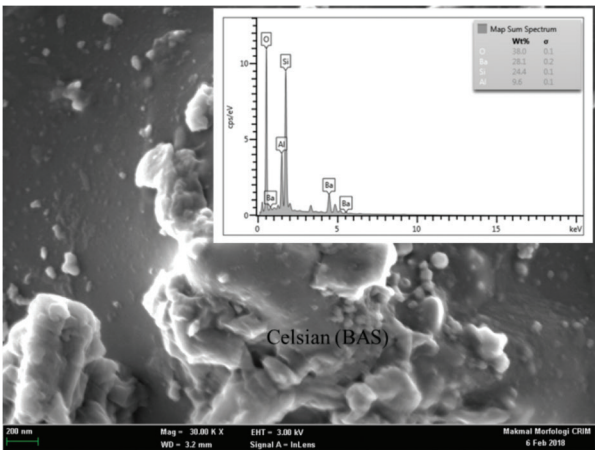
Ketebalan maksimumnya adalah 0.38 mmPb yang didapati pada sampel F2 pada keupayaan tiub 90 kV mesin sinar-X. Walau bagaimanapun, berdasarkan kepada sampel yang dibakar pada suhu yang berbeza, didapati tiada sebarang perubahan ketebalan signifikan ditunjukkan. Perkara ini adalah disebabkan tiada perubahan pada fasa struktur mikro dan morfologi seramik tersebut walaupun ia dibakar pada suhu tinggi sehingga 1100°C seperti yang diberikan oleh keputusan XRD dan FESEM. Nilai ketebalan kesetaraan plumbum bagi sampel seramik ini tidak banyak berubah dan ia masih mengekalkan tahap



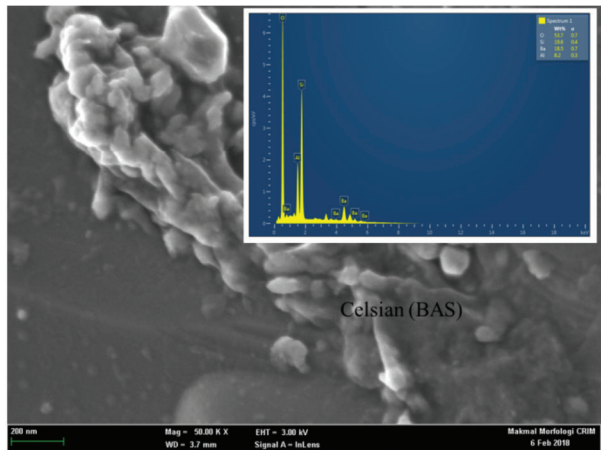
RAJAH 3(a). Sampel F1 terdapat kehadiran fasa barium aluminosilikat (BAS)



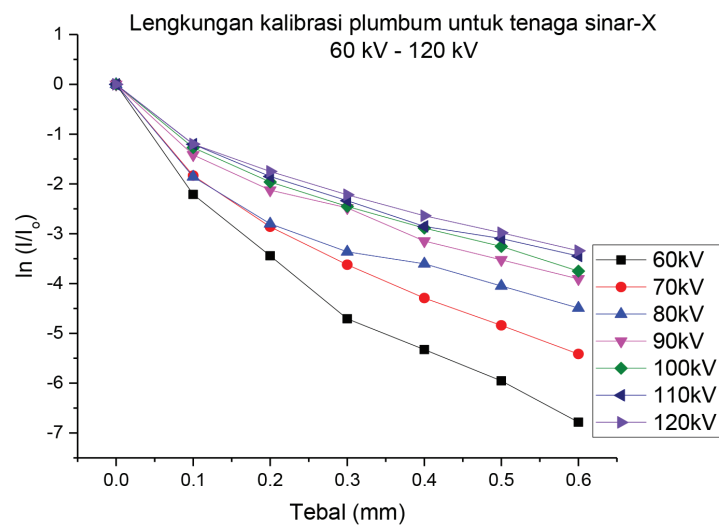
RAJAH 3(b). Sampel F2 terdapat kehadiran fasa barium aluminosilikat (BAS)



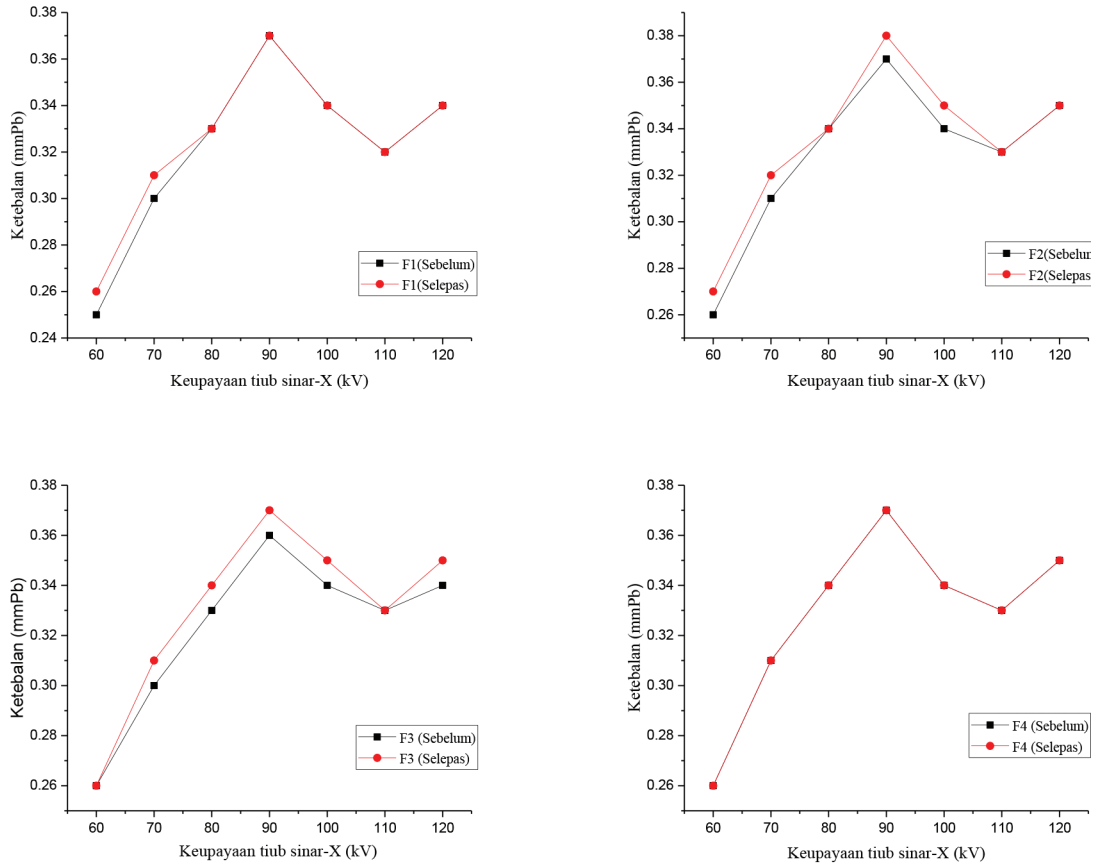
RAJAH 3(c). Sampel F3 terdapat kehadiran fasa barium aluminosilikat (BAS)



RAJAH 3(d): Sampel F4 terdapat kehadiran fasa barium aluminosilikat (BAS)



RAJAH 4. Graf lengkungan kalibrasi bagi kepingan plumbum bagi tenaga sinar-X diagnostik (60 kV sehingga 120 kV)



RAJAH 5. Ketebalan kesetaraan plumbum (mmPb) bagi sampel F1, F2, F3 dan F4 sebelum dan selepas kebakaran X pada julat tenaga sinar-X perubatan (60 - 120 kV) dengan F1 (tiada kebakaran), F2 (dibakar pada suhu 400°C), F3 (dibakar pada suhu 900°C) dan F4 (dibakar pada suhu 1100°C)

pemeriksaan sinar-X walaupun terbakar pada suhu yang tinggi disebabkan oleh ketahanan seramik tersebut terhadap kadar tekanan haba adalah sangat baik. Bagi seramik yang homogen dan isotropik seperti sampel MBC ini, tiada tekanan pada struktur bahan akan meningkat walaupun terdapat perubahan suhu baru yang diberikan kepada sampel tersebut (Kingrey 1955). Tekanan ini sebenarnya akan menyebabkan tekanan haba yang mendorong seramik tersebut akan mengembang dan seterusnya akan menyebabkan berlakunya retakan yang akhirnya merubah tahap pemeriksaan bagi sesuatu bahan perlindungan sinaran. Jika seramik tersebut tidak homogen dan isotropik, tekanan akan berlaku disebabkan oleh pengembangan antara kristal atau fasa yang berbeza di dalam struktur seramik tersebut (Kingrey 1955). Bagi MBC, ini tidak berlaku kerana ia mempunyai satu fasa *celsian* atau fasa barium aluminosilikat (BAS) sahaja. Fasa ini berada dalam keadaan stabil dan tidak akan berlaku perubahan fasa jika suhu yang dikenakan berada di bawah takat leburnya (Bansal et al 1992).

Nilai keseragaman bagi setiap sampel MBC diukur pada tiga tempat berbeza pada setiap set sampel seramik. Keseragaman sebelum dan selepas simulasi kebakaran agak sama dan sedikit rawak berbanding dengan

ketebalan kesetaraan plumbum. Walau bagaimanapun, nilai keseragaman ini masih boleh diterima kerana keseragaman maksimum adalah pada 3.6% dalam bidang perubatan bagi tujuan perlindungan sinaran nilai piawai kebolehlulangan output sinaran bagi ujian kawalan mutu (QC) mesin sinar-X adalah pada kadar 5% (KKM 2017).

## KESIMPULAN

Prestasi cemerlang pemerisian sinaran bagi prototaip MBC ditunjukkan melalui ujian ketebalan kesetaraan plumbum (LE) dan keseragaman dengan mengekalkan ketebalan serta keseragaman pada semua sampel MBC sebelum dan selepas simulasi kebakaran dijalankan. Manakala sifat struktur mikro utama iaitu matriks barium aluminosilikat (BAS) yang menjadi fasa pemeriksaan sinaran bagi seramik ini masih kekal dan tak berubah walaupun dibakar pada suhu kebakaran setinggi 1100°C. Berdasarkan kepada kajian ini, didapati protaip MBC ini sangat sesuai digunakan sebagai perisai perlindungan sinar pada kemudahan penyinaran terutamanya pada kemudahan sinar-X perubatan kerana mempunyai integriti pemeriksaan sinaran yang tinggi walaupun berlakunya kebakaran bangunan atau bilik.

## PENGHARGAAN

Ucapan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada Jabatan Perkhidmatan Awam (JPA) Malaysia, Kementerian Sains Teknologi dan Inovasi (MOSTI) dan Agensi Nuklear Malaysia kerana memberikan hadiah latihan persekutuan (HLP) dan bantuan latihan dalam perkhidmatan dan kemudahan peralatan penyelidikan. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM) dan Pusat Penyelidikan dan Instrumentasi (CRIM) atas bantuan penggunaan peralatan penyelidikan dan kepakaran.

## RUJUKAN

- Amritphale, S.S., Anshul, A., Chandra, N. & Ramakrishnan, N. 2007a. A novel process for making radiopaque materials using bauxite - red mud. *Journal of European Ceramic Society* 27: 1945-1951.
- Amritphale, S.S., Anshul, A., Chandra, N. & Ramakrishnan, N. 2007b. Development of celsian ceramics from fly ash useful for X-ray radiation-shielding application. *Journal of European Ceramic Society* 27(16): 4639-4647.
- Bansal, N.P. 2003. Celsian formation in fiber-reinforced barium aluminosilicate glass-ceramic matrix composites. *Materials Science and Engineering A32(2203)*: 23-27.
- Bansal, N.P. & Drummond, C.H. 1992. *Kinetics of Hexacelsian to Celsian Phase Transformation in SrAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub>*. National Aeronautics and Space Administration (NASA), E-7397.
- Büermann, L. 2016. Determination of lead equivalent values according to IEC 61331-1:2014- report and short guidelines for testing laboratories. *Journal of Instrumentation* 11(9): T09002.
- Drummond, C.H. & Bansal, N.P. 1990. *Crystalliation Behavior and Properties of BaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub> Glass Matrices*. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Contractor Report 185209.
- Filmore, D.L. 2004. *Literature Review of the Effects of Radiation and Temperature on the Aging of Concrete*. Idaho National Engineering and Environmental Laboratory Bechtel BWXT Idaho, LLC., INEEL/EXT-04-02319.
- <http://www.infomine.com>. 2017
- [http://www.utusan.com.my/utusan/info.asp?y=1998&dt=0716&pub=Utusan\\_Malaysia&sec=Dalam%5FNegeri&pg=hn\\_04.htm](http://www.utusan.com.my/utusan/info.asp?y=1998&dt=0716&pub=Utusan_Malaysia&sec=Dalam%5FNegeri&pg=hn_04.htm). Kadar Kebakaran Masih Tinggi, Arkib 16/07/1998.
- Kementerian Kesihatan Malaysia (KKM). 2017. *Manual Pelaksanaan Program Jaminan Kualiti (QAP) dalam Perkhidmatan Radiologi*. Putrajaya: Malaysia.
- Keshk, A.B. & Aly, R.A. 2012. Fire events effect on concrete shielding of Co-60 industrial irradiation facilities. *Arab Journal of Nuclear Science and Applications* 45(4): 109-121.
- Kingrey, W.D. 1955. Factor affecting thermal stress resistance of ceramic materials. *Journal of the American Ceramic Society* 38(1): 3-15.
- Kodur, V. 2014. Properties of concrete at elevated temperatures. *ISRN Civil Engineering* 2014: Article ID. 468510.
- Ripin, A., Mohamed, F., Choo, T.F., Yusof, M.R., Hashim, S. & Goshal, S.K. 2018. X-ray shielding behavior of kaolin derived mullite-barites ceramic. *Journal of Radiation Physics and Chemistry* 144: 63-68.
- Rahim, M.S.N. 2015. The current trends and challenging situations on fire incident statistics. *Journal of Forensic Sciences* 6(1): 63-78.
- Ouda, A.S. 2015. Development of high-performance heavy concrete using different aggregates for gamma-ray shielding. *Journal of Progress in Nuclear Energy* 79: 48-55.
- TS EN 206-1, 2002. Concrete- Part: Specification, Performance, Production and Conformity TSE (Ankara: Turkey).
- Azuhar Ripin  
Medical Physics Group  
Malaysia Nuclear Agency  
43000 Kajang, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia
- Azuhar Ripin, Faizal Mohamed\*, Mohd Idzat Idris & Nur Syafika Suhaimin  
Nuclear Science Program  
Faculty of Science and Technology  
Universiti Kebangsaan Malaysia  
43600 UKM Bangi, Selangor Darul Ehsan  
Malaysia
- \*Pengarang untuk surat-menyurat; email: [faizalm@ukm.edu.my](mailto:faizalm@ukm.edu.my)
- Diserahkan: 5 Jun 2018  
Diterima: 29 Oktober 2018