

Cirian Mekanik Terpilih dan Larutresap Bata Geopolimer berasaskan Amang Lombong Emas dengan Bahan Tambah Sisa Plastik Mikro (Some Selected Mechanical Properties and Leaching Test of Geopolymer Brick based on Gold Mine Tailings with Added Material of Micro Plastic Waste)

ZULFAHMI ALI RAHMAN*, SUHAIMI MOHAMED SETH, WAN MOHD RAZI IDRIS & TUKIMAT LIHAN

*Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM
Bangi, Selangor, Malaysia*

Diserahkan: 7 Mei 2024/Diterima: 3 Oktober 2024

ABSTRAK

Penggunaan amang lombong emas (ALE) dan sisa plastik mikro (SPM) mampu mengurangkan kesan masalah lambakan sisa. Penghasilan bata geopolimer (BGP) menggunakan sisa industri sebagai bahan pengikat tanpa melibatkan pembakaran berpotensi sebagai alternatif kepada bata konvensional dan simen portland biasa (OPC). Kajian ini bertujuan melihat pengaruh penambahan SPM terhadap sifat mekanik bata geopolimer (BGP) yang dibangunkan daripada sisa lombong emas. Ujian larutresap turut dilakukan terhadap bata geopolimer bagi melihat penggunaan sisa ini terhadap pelepasan beberapa logam berat terpilih. Sampel bata geopolimer dihasilkan daripada campuran ALE (prakursor) dan SPM sebagai bahan tambah di dalam persekitaran beralkali tinggi, NaOH (pengaktif alkali). Tiga set sampel BGP dihasilkan terdiri daripada 100% ALE 0% SPM (SPM0), 95% ALE 5% SPM (SPM5) dan 90% ALE 10% SPM (SPM10). Berdasarkan hasil analisis XRD, didapati ALE mengandungi silikon dioksida, SiO₂ (68.4%) dan aluminium dioksida Al₂O₃ (17.7%). Hasil analisis pengecutan linear mendapati isi padu sampel BGP semakin menyusut dengan pertambahan SPM dengan nilai pengecutan maksimum bagi SPM0 adalah 9.35% dan nilai tersebut terus menyusut kepada 7.18% dan 5.59% bagi SPM5 dan SPM10. Nilai serapan air menunjukkan peningkatan dengan pertambahan kandungan SPM iaitu daripada 1.16% (SPM0), 4.57% (SPM5) dan 4.92% (SPM10). Ini dikaitkan dengan kehadiran sempadan berjarak di antara zarah SPM dan bahan geopolimer. Nilai serapan air yang diperolehi adalah memenuhi syarat bagi bata kejuruteraan Kelas A (4.5%) dan Kelas B (7.0%). Nilai kekuatan mampatan pula menunjukkan penyusutan dengan peningkatan kandungan SPM berjulat antara 10.17 MPa dan 38.50 MPa. Julat kekuatan yang didapati adalah melepasi nilai piawaian MS 76:1972 (2.8 MPa - 5.2 MPa). Ujian larut resap mendapati logam berat yang dibebaskan oleh bata geopolimer (BGP) adalah masih rendah berbanding piawaian USEPA.

Kata kunci: Bata; geopolimer; kekuatan mampatan; serapan air; sisa plastik mikro

ABSTRACT

The application of gold mine tailing (ALE) and micro plastic waste (SPM) can minimise the impact of waste dumping problems. The production of geopolymer bricks (BGP) using industrial waste as binding material without involving combustion is a potential alternative to conventional bricks and Ordinary Portland Cement (OPC). The aim of this study was to examine the effect of microplastic (SPM) addition on the mechanical characteristics of geopolymer brick developed from gold mine tailing (ALE). Leaching test was also performed on geopolymer brick in order to investigate the release of certain heavy metals as a result of using these wastes. Geopolymer brick samples were made from ALE (precursor) and SPM as an additive material in a high alkaline medium (alkali activator). Three sets of BGP samples were produced comprised 100% ALE with 0% SPM (SPM0), 95% ALE with 5% SPM (SPM5) and 90% ALE with 10% SPM (SPM10). Based on the XRD analysis, ALE composed primarily of silicon dioxide, SiO₂ (68.4%) and aluminium dioxide Al₂O₃ (17.7%) which are the main elements needed for development of geopolymer bricks. The result of linear shrinkage analysis found that the volume of the BGP samples decreased as SPM increased, with the maximum shrinkage value for SPM0 of 9.35% and continuing to decrease to 7.18% and 5.59% for SPM5 and SPM10. The water absorption value increased with increasing of SPM content, from 1.16% (SPM0) to 4.57% (SPM5) and 4.92% (SPM10). This is a result of the presence of a gap boundary between the SPM particles and the geopolymer substance. The obtained water absorption value satisfies the Class A (4.5%) and Class B (7.0%) engineering brick criteria. The compressive strength value decreased with increasing SPM content, ranging between 10.17 MPa and 38.50 MPa. The strength range observed exceeds the MS 76:1972 recommended value (2.8 MPa - 5.2 MPa). Leaching test showed that heavy metals produced by BGP bricks were still below USEPA requirements. The acid

resistance test of the BGP sample was found to be lower (30.32%) than mortar (39.0%) and conventional Portland cement (56.6%). This study demonstrated that ALE waste has the potential to be used as an alternative material in the development of geopolymer bricks; however, some mechanical factors, such as the amount and type of microplastic waste, as well as acid resistance, must be further optimized.

Keywords: Brick; compressive strength; geopolymer; micro plastic waste; water absorption

PENDAHULUAN

Industri pembinaan menunjukkan corak peningkatan di serata dunia termasuk Malaysia. Sepanjang tempoh 20 tahun (1990-2010) purata sumbangan sektor pembinaan negara adalah sebanyak 4.1% (Raza, Mohd Shahir & Zulkipli 2014). Berdasarkan laporan yang dikeluarkan oleh Jabatan Perangkaan Malaysia, Indeks Kos Bahan Binaan (IKB) meningkat antara 4.4% dan 18.5% pada Jun 2022 berbanding tahun 2021 (Jabatan Perangkaan Malaysia 2022). Purata harga simen di pasaran turut mencatatkan peningkatan sebanyak 12.2% pada Mei 2022 dengan RM21.05/50 kg berbanding RM18.66/50 kg pada Jun 2021. Bata merupakan bahan binaan yang meluas digunakan dalam sektor pembinaan dan dianggarkan 1.3 trilion bata dihasilkan setiap hari (Idrees et al. 2023). Sekitar 20 bilion meter padu bata tanah liat telah dihasilkan di China dalam tempoh lima dekad dan kuantiti pengeluaran ini dijangka terus meningkat saban tahun (Chen et al. 2011). Bata boleh terdiri daripada jenis bata tanah liat atau bata daripada campuran simen dan pasir. Secara tradisi, penghasilan bata liat melibatkan penggunaan tanah liat atau syal yang memerlukan suhu pembakaran tinggi sekitar 900-1000 °C dan pastinya akan menyumbang kepada peningkatan kos pengeluaran (Abidi 2007; Ahmari & Zhang 2012). Penghasilan simen pula dikaitkan dengan jejak karbon kerana 8-10% pembebasan CO₂ dunia adalah berpunca daripada kilang simen (Suhendro 2014). Aktiviti kuari di peringkat hulu bertanggjawab kepada kerosakan landskap, gangguan hingar dan pencemaran terhadap udara, air dan tanah (Ali Rahman et al. 2023). Eksploitasi berterusan sumber tanah liat juga menyebabkan masalah kehausan sumber semula jadi yang tidak boleh diperbaharui (Yang et al. 2014). Oleh itu, pendekatan alternatif diperlukan bagi menghasilkan bahan binaan yang lebih murah, selamat, berdaya saing dan mesra alam. Kitar semula ini dapat memberikan kelebihan aspek kos bahan yang diperlukan dan nilai tambah sisa yang dikitar semula (Ali Rahman et al. 2022; Roy, Adhikari & Gupta 2007).

Aktiviti perlombongan emas terus berkembang sejajar dengan peningkatan permintaan sektor elektronik seperti komputer dan telefon pintar (Deng et al. 2014; Lu et al. 2018). Aktiviti perlombongan bertanggungjawab menghasilkan hampir 250,000 juta tan sisa pepejal setiap tahun dalam bentuk berbeza (Lottermoser 2010). Amang merupakan hasil sampingan daripada pemrosesan pengekstrakan logam emas yang terdiri daripada campuran sedimen dan pecahan halus batuan. Kuantiti amang bergantung kepada gred bijih, semakin tinggi gred

maka semakin kurang amang yang dihasilkan (Lu & Cai 2012). Proses ekstraksi bijih menghasilkan lebih 99% daripada bijih yang diekstrak merupakan amang (Adler & Rascher 2007). Kebiasaannya, amang dipindahkan ke tapak atau lagun bagi tujuan pengeringan dan penstabilan selanjutnya. Amang lombong emas dicirikan oleh sifat agregat yang lemah, kekonduksian hidraulik yang tinggi, bertekstur halus dan daya jelikatan yang sangat terhad yang membezakannya daripada tanah (Blight & Fourie 2005). Penambahan amang lombong emas ke dalam campuran bata memberi kesan terhadap cirian mekanik seperti pengecutan linear, serapan air dan kekuatan mampatan (Loaiza et al. 2020; Roy, Adhikari & Gupta 2007). Kajian Wei et al. (2021) terhadap campuran tanah liat dan amang lombong emas menunjukkan terdapat perhubungan antara kekuatan mampatan dengan kandungan liat dan serapan air. Peningkatan kandungan tanah liat selari dengan peningkatan kekuatan mekanik manakala sebaliknya bagi nilai serapan air. Benahsina et al. (2022) mendapati bahawa bata tanah liat dibakar pada suhu 1000 °C dan 1050 °C dengan 80% campuran amang lombong emas memenuhi syarat keperluan bagi kejuruteraan awam dan kejuruteraan sekitaran. Penambahan amang lombong emas dapat mengurangkan penggunaan pasir dalam pembuatan konkrit seterusnya mengelakkan aktiviti kuari secara intensif yang mengancam ekosistem semula jadi (Widojoko, Hardjasaputra & Susilowati 2014). Cirian mekanik campuran amang lombong emas bagi simen mortar dan konkrit semakin bertambah baik dengan ketara di samping keupayaan mengawal pelepasan logam berat ke persekitaran (Ince 2019; Parthasarathi, Ramalinga Reddy & Satyanarayan 2016). Selain daripada itu, pencemaran berasaskan penggunaan plastik semakin membimbangkan dan menjadi isu alam sekitar di seluruh dunia. Pengeluaran global plastik meningkat daripada 348 juta tan pada tahun 2017 kepada 359 juta tan pada tahun 2018 (PlasticsEurope 2019). Data statistik menunjukkan bahawa kurang daripada 15% sisa plastik di Malaysia dikitar semula pada masa kini (Kementerian Air dan Sumber Asli 2021). Penguraian sisa plastik kepada bersaiz mikro telah meningkatkan sebaran komponen plastik jauh ke dalam sistem organ fungsian fauna dan flora (Aragaw 2021; Bhuyan 2022).

Geopolimer adalah polimer bukan organik yang dihasilkan pada suhu bilik berasaskan sisa industri sebagai bahan asas pengikat yang berfungsi seperti simen portland biasa, OPC (Doğan-Sağlamtimur, Bilgil & Öztürk 2018). Penghasilan bata berasaskan sisa lombong dengan pendekatan geopolimerisasi dapat mengurangkan

atau menggantikan secara langsung penggunaan simen portland biasa (OPC) tanpa mengubah cirian mekaniknya. Ia bersifat mesra alam, tanpa pembakaran, lebih ekonomik dan mengurangkan pembebasan gas CO₂ daripada sektor pembinaan sebanyak 80% (Davidovits 2015). Ia dihasilkan melalui tindak balas bahan aluminosilikat dalam medium beralkali berkepekatan tinggi (Ahmari & Zhang 2012; Rao & Liu 2015). Pengaktif alkali yang biasa digunakan dalam proses geopolimerisasi ialah natrium hidroksida, NaOH, natrium silikat, Na₂SiO₃, kalium hidroksida, KOH dan kalium silikat, K₂SiO₃. Larutan alkali mengurai aluminosilikat dan membolehkan molekul bahan tersebut membina jaringan 3D yang merupakan gel amorfus sebelum mengeras sebagai geopolimer atau bahan bercirikan simen (Adajar et al. 2012). Ia mempunyai kekuatan mekanik yang tinggi, tahan haba dan stabil (Castillo et al. 2021). Kajian menunjukkan penggunaan amang lombong emas dalam pembangunan bahan binaan alternatif menunjukkan hasil yang positif dari aspek mekanik (Aseniero et al. 2018; Caballero, Sánchez & Ríos 2014; Mabroum et al. 2021; Rao & Liu 2015). Kajian juga mendapati bahawa amang lombong emas turut mengandungi aluminosilikat yang tinggi bagi membolehkan berlaku proses geopolimerisasi (Adajar et al. 2021; Rao & Liu 2015). Penyelidikan ini bertujuan mengkaji cirian mekanik sampel bata geopolimer yang dihasilkan daripada amang lombong emas (ALE) dan sisa plastik mikro (SPM) sebagai bahan tambah pada nisbah berbeza. Cirian mekanik yang diperhatikan melibatkan pengecutan linear, ketumpatan, serapan air dan kekuatan mampatan. Ujian larut resap turut dijalankan bagi menentukan kehadiran dan tahap pelepasan logam berat terpilih hasil daripada penggunaan sisa lombong. Sisa lombong emas boleh teroksidakan kesan tindak balas dengan udara dan air, mengakibatkan penghasilan mineral sulfida (Fe₂S, Fe_{1-x}S dan Cu₂S), melepaskan asid sulfurik dan oksida logam seperti ferus oksida, FeO yang dikaitkan dengan fenomena saluran asid lombong (Nehdi & Tariq 2007). Penggunaan bata berasaskan sisa seharusnya mampu menghalang pelepasan logam berat ke persekitaran akibat daripada dedahan terhadap komponen udara dan jasad air (Ahmari & Zhang 2013). Penghasilan bata geopolimer berasaskan ALE dan campuran SPM ini dapat memberikan nilai tambah sisa industri di samping membantu pengurusan pelupusan sisa melalui kitar semula sebagai sumber bahan asas alternatif.

BAHAN DAN KAEDAH

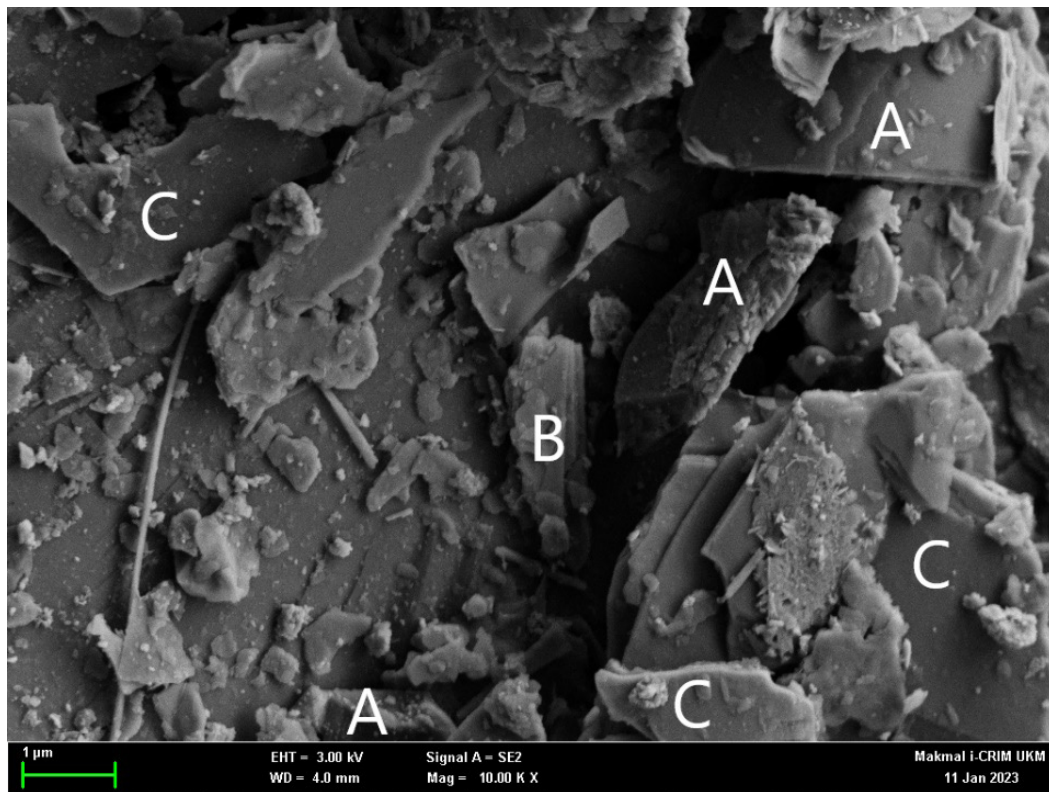
BAHAN KAJIAN

Bahan utama dalam kajian ini melibatkan penggunaan amang lombong emas (ALE) dan sisa plastik mikro (SPM). ALE dibekalkan oleh Selinsing Gold Mine Sdn. Bhd., terletak 4 km di sebelah Barat Laut Felda Sungai Koyan, Kuala Lipis, Pahang dan kira-kira 65 km ke utara Raub dan 30 km ke barat Kuala Lipis. Lombong ini meliputi

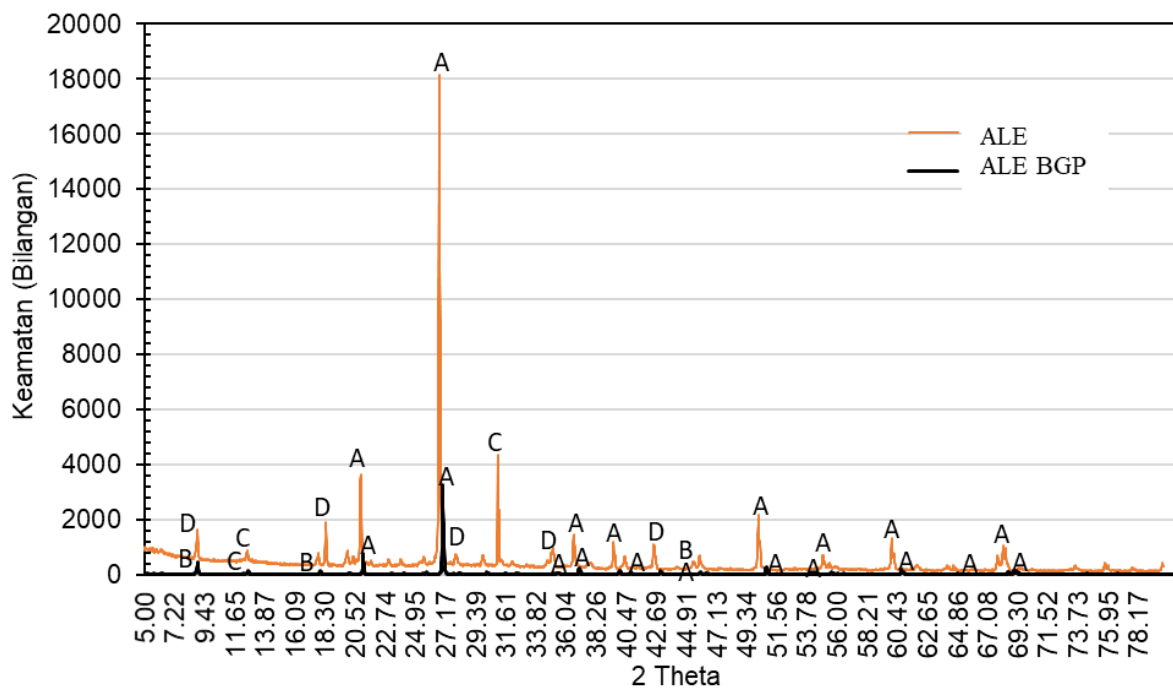
kawasan seluas 150.3 km² yang terletak di Jalur Emas Tengah merangkumi lombong emas Selinsing dan Buffalo Reef. Sampel ALE yang dibekalkan adalah separa kering, beragregat dan berwarna kuning kemerahan hingga kelabu cerah. Imej mikroskop imbasan elektron (FESEM) bagi sampel ALE menunjukkan kehadiran mineral kaolinit yang dominan dengan cirian struktur berkeping (Rajah 1). Manakala sampel SPM diperoleh daripada pasaran bagi mewakili bahan tambah dalam pembuatan bata geopolimer. Takrifan plastik mikro meliputi sisa plastik dengan diameter tidak melebihi 5 mm (Uvarajan et al. 2021). Sisa plastik mikro yang digunakan dalam kajian ini terdiri daripada manik plastik polipropilena (PP) yang bersaiz 3-4 mm diameter dan berwarna putih. Sisa SPM merupakan sisa yang mempunyai jangka hayat yang lama dan berpotensi mencemar hidupan dan ekosistem semula jadi (Yadav, Chandra & Singh 2022).

Ringkasan pencirian asas bagi ALE yang digunakan dalam kajian ini ditunjukkan oleh Jadual 1. ALE yang digunakan adalah bersifat asid lemah (pH 6.23) dengan khusus graviti, G_s 2.63. Kehadiran bahan organik adalah rendah dengan tekstur jenis liat berlodak (CM) dengan fraksi lodak dan tanah liat mendominasi fraksi pasir. Kandungan sampel ALE didominasi oleh kuarza, muskovit dan kaolinit dengan luas permukaan tentu sebesar 4.05 m²/g. Manakala had Atterberg dengan nilai had cecair, had plastik dan indeks keplastikan masing-masing 22.50%, 18.95% dan 3.55%. Keadaan pH ALE bergantung kepada kehadiran kandungan sulfida yang tinggi dan kepekatan logam dalam air bawah tanah sekitar tapak tambakan amang (Fashola, Ngole-Jeme & Bablola 2016). Proses larut resap yang melibatkan penggunaan sianida bagi ekstraksi emas menyebabkan penghasilan larutan beralkali tinggi (Asoy et al. 2017). Pengapuran digunakan oleh pihak operator Selingsing Gold Mine bagi mengurangkan pH beralkali kepada bersifat asid lemah. Nilai G_s ALE berjulat 2.58 dan 2.78 dengan purata 2.63 iaitu sedikit rendah berbanding Mashifana, Sithole dan Mkhonto (2019) dan Rassam dan Williams (1999) berjulat antara 2.75 dan 2.89. Ini boleh disebabkan oleh kehadiran bahan organik yang secara relatif lebih ringan hadir di dalam sampel ALE (Gui et al. 2021). Umumnya, kehadiran bahan organik adalah sangat rendah dalam ALE dan mewakili 1/5 berbanding tanah (Oades 1984). Berdasarkan ujian gas N₂ bagi penentuan permukaan tentu, ALE dikategorikan sebagai berliang mikro dan meso yang mewakili diameter kurang 2 nm dan 2 nm - 50 nm (Chan 2023; Rouquerol et al. 2013). Pengekalan dan pergerakan air, kapasiti pertukaran kation dan penjerapan bagi kation/ion berkait rapat dengan luas permukaan tertentu bagi sesuatu kompleks mineral liat (Carter, Mortland & Kemper 1986).

Had Atterberg bagi sampel ALE menunjukkan nilai had cecair, w_c dan had plastik, w_p masing-masing 22.50% dan 18.95% dengan indeks keplastikan, I_p 3.55% (Jadual 1). Bahan yang mempunyai had cecair atau indeks keplastikan yang lebih tinggi harus mempunyai kekonduksian hidraulik



(a)



(b)

RAJAH 1. (a) Imej FESEM bagi ALE yang digunakan dan (b) Kehadiran mineral kuarza (A), muskovit (B) dan kaolinit (C) yang ditemui dalam ALE berdasarkan XRD

JADUAL 1. Ringkasan pencirian asas terhadap ALE yang digunakan

Parameter	Nilai
Nilai pH	6.23±0.20
Graviti khusus, G_s (g/cm ³)	2.63±0.06
Kandungan bahan organik (%)	0.72±0.15
Taburan saiz zarah (%)	
Liat	46.00
Lodak	49.47
Pasir	4.54
Tekstur	Liat berlodak (CM)
Luas permukaan tentu (m ² /g)	4.05±0.14
Had Atterberg	
Had cecair, w_c (%)	22.50±1.03
Had plastik, w_p (%)	18.95±0.75
Indeks keplastikan, I_p (%)	3.55±1.78
Kandungan mineral (XRD)	Kuarza, muskovit, kaolinit
Pendaflour sinar-X (XRF) (%)	Silikon dioksida, SiO ₂ (68.4) Aluminium dioksida Al ₂ O ₃ (17.7)

yang lebih rendah (Benson, Zhai & Wang 1994). Analisis XRD ke atas sampel ALE menunjukkan kehadiran mineral kuarza, (SiO₂), kaolinit (Al₂Si₂O₅(OH)₄) dan muskovit (KAl₂(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂). Terdapat sedikit perubahan kepada ALE yang digunakan dalam bata geopolimer dengan menunjukkan kehadiran tonalit (KLiMg₂Si₄O₁₀(F₂OH)₂) dan lengkok XRD mengalami sedikit anjakan ke atas (Rajah 2).

PENYEDIAAN SAMPEL BATA

Sampel ALE melalui proses kering udara terlebih dahulu di bilik pengeringan selama seminggu. Agregat sampel ALE dihancurkan secara manual dan diayak melalui ayak bersaiz 2 mm. Hasil ayakan ini digunakan untuk analisis pencirian asas dan penyediaan sampel bata geopolimer (BGP). ALE merupakan prakursor (P) yang ditindakbalaskan dengan alkali molar tinggi, 10M NaOH. Kenormalan larutan NaOH adalah setara dengan kemolaran larutan (10M NaOH = 10N). Jisim molekul relatif (JMR) bagi NaOH adalah 40 yang memerlukan 40 g NaOH dilarutkan dalam 1 L air untuk menghasilkan 1M (1N). Oleh itu, bagi mendapatkan 0.5 L (500 mL) isi padu larutan 10M NaOH memerlukan 200 g pelet NaOH. Persamaan berikut dirujuk bagi menentukan jisim NaOH yang diperlukan bagi molar dan isi padu tertentu:

$$\text{Jisim NaOH yang diperlukan (g)} = \text{JMR} \times M \times V \quad (1)$$

dengan JMR adalah jisim molekul relatif; M adalah molar dan V adalah isi padu (L). Sebanyak 200 g pelet NaOH disediakan dan ditambah ke dalam bikar kaca 1000

mL yang berisi 300 mL air suling. Proses pelarutan ini melibatkan tindak balas hipertermik (menghasilkan haba) dan penambahan pelet NaOH perlu dilakukan dengan kuantiti yang kecil secara beransur-ansur. Pengacau bermagnet digunakan sehingga semua pelet NaOH larut sepenuhnya. Setelah itu larutan dimasukkan ke dalam kelalang kon isi padu 500 mL dan air suling ditambah sehingga mencapai isi padu 500 mL (0.5 L). Setelah 24 jam larutan natrium hidroksida (NH) disediakan, larutan ini ditambahkan dengan larutan natrium silikat (NS) dalam nisbah NS:NH, 2 bagi menyediakan larutan pengaktif alkali (Yener & Karaşlan 2020). Nisbah campuran ini dilakukan berdasarkan jisim per jisim bukan berasaskan isi padu. Ini disebabkan NS dan NH mempunyai ketumpatan (g/cm³) yang berbeza di antara satu sama lain. Oleh itu penyediaan larutan pengaktif alkali (AA) berasaskan jisim dilakukan dengan menambahkan 80 g NS (Na₂SiO₃) dan 40 g NH (NaOH 10M) lalu dikacau dengan menggunakan pengacau bermagnet. Campuran ini dibiarkan pada suhu bilik selama 24 jam bagi memastikan larutan ini homogen sebagai pengaktif alkali yang akan bertindak balas dengan prakursor dalam proses geopolimerisasi.

Penyediaan sampel bata geopolimer melibatkan pencampuran prakursor (P) dan larutan pengaktif alkali (AA) pada nisbah pepejal/cecair, (S/L), 0.285. Nilai ini berdasarkan kepada beberapa percubaan awal dengan nisbah S/L berbeza (0.27 dan 0.25) yang menghasilkan bata geopolimer yang rapuh dengan pembentukan hablur garam secara berterusan semasa proses pengeringan sampel bata. Nisbah S/L yang terlalu rendah juga didapati tidak sesuai kerana nisbah di bawah 2.0 membawa kepada kebolehpayaan yang rendah (Yao et al. 2009).

Umumnya, nilai *S/L* yang sesuai adalah berada di antara nilai *S/L* 2.5 dan 4.0 (Gado et al. 2020). Kesan pembentukan hablur garam yang masih diperhatikan pada sampel bata memerlukan penelitian terhadap sampel ALE yang digunakan. Pengiraan terhadap nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dilakukan berdasarkan data XRF yang diperolehi (Jadual 2). Kajian lepas menunjukkan nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dan $\text{Na}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ dengan nilai 1.9 menghasilkan nilai kekuatan mampatan maksimum yang tinggi sekitar 95 MPa (Duxson et al. 2007). Castillo et al. (2021) pula mendapati nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang sesuai berjulat antara 1.5 dan 2.0. Terdapat kajian menunjukkan nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 10.7 telah menghasilkan bata geopolimer dengan kekuatan maksimum 10 MPa (Falayi 2019). Pengubahsuaian yang dilakukan terhadap nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 3.86 masih berada dalam julat nilai yang dicadangkan oleh kajian lepas. Ini dilakukan dengan menambahkan sebanyak 7.75% aluminium hidroksida, $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ kepada ALE sebagai perawatan bagi meningkatkan komponen Al dan seterusnya menurunkan nisbah Si/Al daripada 3.41 kepada 2.81. Selain daripada nisbah $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, faktor nisbah $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ juga perlu diperhatikan kerana ia mempengaruhi ciri mekanikal bata yang dihasilkan (Castillo et al. 2021). Nilai $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ yang digunakan bagi penyediaan sampel bata ditunjukkan oleh Jadual 2.

Penyediaan sampel bata dilakukan dengan memastikan bahawa ALE telah dirawat terlebih dahulu dengan menambahkan 7.75% aluminium hidroksida, $\text{Al}_2(\text{OH})_3$ dan digaul hingga sebati bagi menjadikannya sebagai ALE terawat. Selepas daripada itu baharulah plastik mikro ditambahkan kepada sampel ALE berkenaan berdasarkan nisbah berbeza mengikut jenis sampel (Jadual 3). Nisbah *S/L* diambil kira dengan komponen pepejal melibatkan ALE dan SPM manakala komponen cecair terdiri daripada campuran NH (NaOH) dan NS (Na_2SiO_3). Proses geopolimerisasi yang berlaku terhadap campuran ini mengakibatkan berlakunya perubahan terhadap nisbah *S/L* pada peringkat awal dan selepas proses geopolimerisasi berlaku (Jadual 4). Campuran plastik mikro dan ALE tersebut digaul rata sebelum larutan pengaktif alkali (AA) ditambah secara beransur-ansur kepada campuran. Larutan AA perlu dicampurkan sedikit demi sedikit bagi memastikan semua bahan dapat diadun sehingga membentuk campuran yang homogen bagi membolehkan proses geopolimerisasi berlaku secara menyeluruh dalam sampel bata tersebut. Campuran ini kemudiannya dipindahkan ke dalam acuan teras dengan ukuran dimensi 40 mm tinggi dan 40 mm diameter. Penyediaan sampel bagi penentuan parameter kekuatan mampatan, sampel bata perlu mempunyai ukuran nisbah 2:1 antara dimensi bagi diameter (80 mm) tinggi sampel bata geopolimer (4 mm).

Kemudian, sampel bata geopolimer dipindahkan ke dalam oven dengan suhu 60 °C selama 24 jam. Pada ketika ini sampel telah mula mengeras dan sampel bata dikeluarkan daripada acuan secara berhati-hati bagi mengelakkan sampel rosak. Sampel bata dimasukkan kembali ke dalam oven bagi meneruskan proses pengeringan pada suhu yang

sama selama 10 hari. Kemudian, suhu oven ditingkatkan kepada 105 °C dan sampel bata dibiarkan selama 3 hari. Setelah itu, sampel dikeluarkan dan dipindahkan ke dalam desikator kaca untuk tujuan rawatan untuk tempoh selama 7 hari sebelum pencirian mekanik dijalankan. Pencirian mekanik yang ditentukan melibatkan pengecutan linear, serapan air dan kekuatan mampatan. Ujian larut resap turut ditentukan terhadap sampel bata geopolimer yang dihasilkan bagi melihat tahap pelepasan logam berat daripada bata geopolimer yang dihasilkan daripada sumber sisa.

LARUT RESAP DAN PENCIRIAN MEKANIK

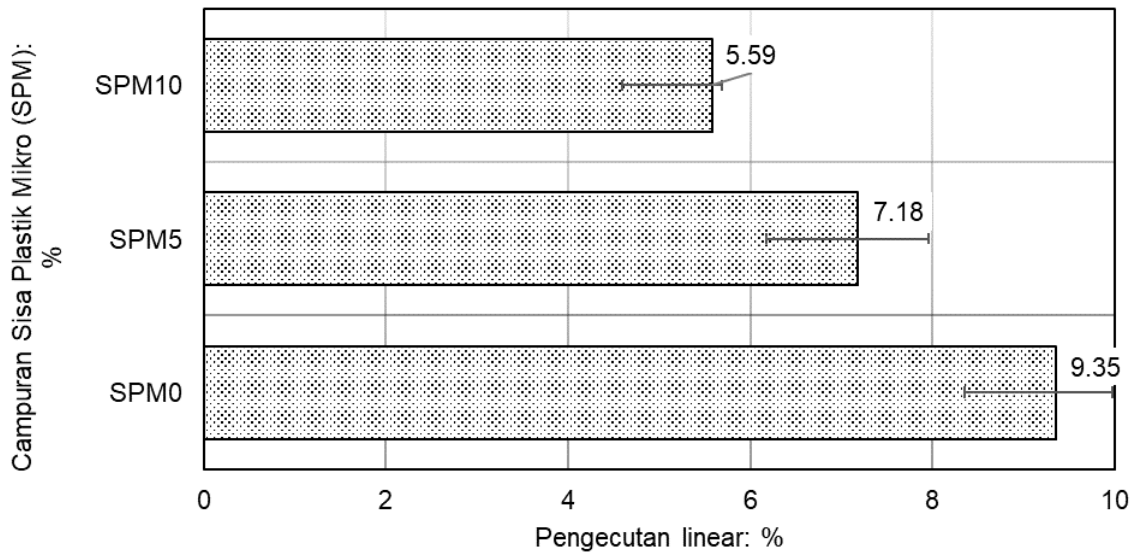
UJIAN LARUT RESAP

Penentuan logam berat perlu dilakukan terhadap produk yang dihasilkan berasaskan sumber sisa buangan. Prosedur ketoksikan larut resap (TCLP) merupakan kaedah yang digunakan menentukan tahap pelepasan logam berat akibat proses larut resap dan sampel yang diperlukan bagi tujuan analisis adalah lebih halus daripada 9.5 mm (Abdul Kadir & Mohajerani 2008; USEPA 1996). Sisa sampel daripada ujian kekuatan mampatan dihancurkan dan diayak bagi mendapatkan saiz butiran sampel antara 0.6 mm dan 2.5 mm. Sampel ini dimasukkan ke dalam larutan asid asetik yang dicampurkan natrium asetat bagi mendapatkan pH 3.3 bagi analisis larut resap. Nisbah pepejal/cecair 1:25 digunakan dengan 33.6 g sampel bata dicampurkan 840 mL larutan natrium asetat. Campuran ini dikacau menggunakan pengacau bermagnet pada 200 rpm dengan suhu kekal pada 30 °C selama 24 jam bagi membenarkan keseimbangan campuran. Kemudian 10 mL sebatian larutan diekstrak menggunakan picagari pada setiap 0.5 jam, 1.0 jam, 1.5 jam, 2.0 jam, 2.5 jam, 2.5 jam, 3.0 jam, 4.0 jam, 8.0 jam, 12.0 jam dan 24 jam. Jumlah ekstrak keseluruhan tidak boleh melebihi 10% daripada jumlah bahan larutan dengan kewujudan ralat purata 5%. Hasil ekstraksi diasingkan dan ditapis dengan menggunakan kertas turas. Hasil turasan sebanyak 2 mL dicairkan 20 kali dengan kepekatan isi padu asid nitrik 5%. Kepekatan logam berat ditentukan dengan alat ICP-MS dan keseluruhan prosedur ini berpandukan kepada Yunsheng et al. (2007). Pengiraan hasil bacaan daripada analisis ICP-MS ditentukan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Kepekatan logam, } LB = (A - B) \times C \times D \quad (1)$$

$$= \left(\frac{\text{mg}}{\text{mL}} - \frac{\text{mg}}{\text{mL}} \right) \times \left(\frac{\text{mL}}{\text{mL}} \right) \times \left(\frac{\text{mL}}{\text{mg}} \right) \quad (2)$$

dengan *A* ialah Bacaan logam berat ICP-MS (ppb)/1,000; *B* ialah Nilai *Blank* ICP-MS (ppb)/1,000; *C* ialah Isi padu larutan kedua/isi padu sampel kali kedua; *D* ialah Isi padu larutan pertama/isi padu sampel kali pertama; dan *LB* = Kepekatan logam berat (mol/L).



RAJAH 2. Corak penyusutan linear bata geopolimer kesan penambahan sisa plastik mikro (SPM)

JADUAL 2. Komponen ALE dan BGP berdasarkan oksida (% jisim) hasil daripada analisis XRF

Oksida	Sampel	
	ALE	BGP
SiO ₂	68.4	60.7
Al ₂ (OH) ₃	17.7	19.0
Na ₂ O	0.215	7.78
Nisbah oksida	Nilai	
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	3.86	3.19 (1.90)
Na ₂ O/Al ₂ O ₃	0.012	0.41 (0.25)

() - Nilai yang digunakan bagi hasil kekuatan mampatan ~95 MPa (Duxson et al. 2007)

JADUAL 3. Penyediaan prakursor mengikut peratusan berbeza antara ALE dan SPM

Sampel	ALE (%)	SPM (%)
SPM0	100	0
SPM5	95	5
SPM10	90	10

JADUAL 4. Perubahan terhadap nisbah S/L kesan daripada proses geopolimerisasi

Sampel	Nisbah S/L	
	Awal	Akhir
SPM0		3.51
SPM5	3.51	3.33
SPM10		3.12

PENGEPUTAN LINEAR

Penentuan parameter ini melibatkan pengukuran dimensi sampel bata geopolimer yang dikaji. Proses pengeringan melibatkan pengeluaran lebih air dan tindak balas geopolimerasi yang menyebabkan ukuran dimensi menyusut. Pengecutan linear menentukan jumlah penyusutan yang berlaku dan sepatutnya nilai parameter tidak ketara kerana ia mempengaruhi kualiti bata (Ali Rahman et al. 2023). Prosedur penentuan pengecutan linear dirujuk kepada BS 1377: 1990 Part 2:6. Pengukuran dilakukan pada setiap dimensi sampel yang terdiri daripada diameter, d_i dan ketinggian, h_i menggunakan angkup vernier dan tali pengukur dengan yang memberikan bacaan sehingga 2 titik perpuluhan. Sebanyak lima sampel bata digunakan dan pengukuran d_i dan h_i pada kedudukan dimensi berbeza pada setiap sampel dilakukan untuk mendapatkan nilai purata dimensi yang diukur. Nilai pengecutan linear, L bagi sampel bata geopolimer diberikan oleh Persamaan (3) dan (4).

$$\text{Pengecutan diameter, } L_d = \frac{L_{do} - L_{di}}{L_{do}} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{Pengecutan tinggi, } L_t = \frac{L_{to} - L_{ti}}{L_{to}} \times 100 \quad (4)$$

dengan L_{do} dan L_{to} masing-masing adalah nilai bagi diameter asal dan akhir manakala L_{di} dan L_{ti} adalah nilai tinggi asal dan tinggi akhir. Nilai asal merupakan nilai ukuran bata sebelum dikeluarkan daripada acuan manakala nilai akhir pula merujuk kepada nilai selepas tempoh rawatan selama 7 hari. Pengecutan linear terhadap dimensi sampel mengakibatkan perubahan isi padu keseluruhan sampel. Oleh itu, berdasarkan pengukuran dimensi, isi padu, V sampel bata turut ditentukan. Perbezaan antara isi padu asal, V_o dan selepas perawatan, V_i diberikan oleh Persamaan (5).

$$\text{Perubahan isi padu, } \Delta V_o = \frac{V_o - V_i}{V_o} \times 100 \quad (5)$$

SERAPAN AIR

Penentuan parameter ini dilakukan dengan menggunakan sampel bata sama bagi pengukuran nilai ketumpatan yang melibatkan perendaman air 24 jam (MS 76: 1972). Sampel bata perlu dikeringkan semula di dalam oven pada suhu 110 °C selama 48 jam sebelum disejukkan ke suhu bilik dan ditimbang, m_d . Selepas itu, sampel bata tadi dimasukkan ke dalam bekas berisi air selama 24 jam. Sampel bata dikeluarkan dan sebarang lebih air dilap dengan kain lembap dan ditimbang semula bagi mendapatkan berat tepu, m_{sat} . Nilai resapan air ditentukan menggunakan Persamaan (8).

$$\text{Serapan air, } W = \frac{m_{sat} - m_d}{m_d} \times 100 \quad (6)$$

KEKUATAN MAMPATAN

Ujian kekuatan mekanik dilakukan ke atas sampel bata geopolimer dengan mengenakan tekanan mampatan secara menegak sehingga sampel mengalami kegagalan. Sampel bata geopolimer dengan nisbah dimensi 2:1 (40 mm diameter dan 80 mm tinggi) digunakan dalam ujian ini (BS EN 772-1 2011). Peralatan ujian universal, UTM Autocon 2000 digunakan dalam kajian ini. Sampel bata diletakkan secara menegak dan pembebanan yang dikenakan ke atas sampel ditingkatkan secara beransur-ansur namun tidak melebihi 35 Nmm⁻² hingga setengah daripada jangkauan beban maksimum. Selanjutnya nilai pembebanan dikurangkan kepada 15 Nmm⁻² sehingga sampel bata mengalami kegagalan. Setelah sampel gagal, pembebanan berhenti secara automatik dengan nilai maksimum, F_{max} . Nilai kekuatan mampatan maksimum, UCS_{max} dengan mengambil kira luas permukaan diameter, A_d dan tinggi, h sampel seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan (9), (10) dan (11).

$$\text{Luas, } A_d = \pi \cdot r^2 \quad (7)$$

$$\text{Luas, } A_d = \pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (8)$$

$$\text{Kekuatan maksimum, } UCS_{max} = \frac{F_{max}}{A_d} \quad (9)$$

HASIL DAN PERBINCANGAN

UJIAN LARUT RESAP

Hasil ujian larut resap terhadap bata geopolimer yang dikaji menunjukkan kepekatan logam berat As, Fe dan Mn adalah lebih tinggi berbanding logam berat lain. Berdasarkan corak kepekatan logam berat, As menunjukkan peningkatan yang ketara pada peringkat awal pensampelan berbanding Fe dan Mn. Begitu juga dengan corak perubahan kepekatan untuk logam-logam berat yang lain kecuali Zn dan Cd. Secara keseluruhan kepekatan logam-logam berat yang dikaji mencapai tahap maksimum dan kepekatan hampir sekata selepas tempoh 8 jam pensampelan dilakukan. Secara perbandingan, kehadiran logam berat dalam bata geopolimer yang dihasilkan adalah masih rendah berdasarkan piawaian USEPA (1984) (Abdul Kadir & Mohajerani 2008). Data analisis ujian larut resap

menunjukkan bahawa kandungan logam berat Ferum (0.2979 mg/L) sahaja yang menghampiri tahap kepekatan yang dibenarkan iaitu daripada 0.3 mg/L bagi tempoh 24 jam (Jadual 5). Berdasarkan hasil ujian larut resap yang diperolehi ia menjadi petunjuk bahawa bata geopolimer yang dihasilkan mampu mengawal pelepasan unsur logam ke persekitaran. Ujian larut resap terhadap bata geopolimer berasaskan sisa lombong emas dengan campuran abu terbang dan sanga relau berbutir (GGBF) menunjukkan bacaan kepekatan yang lebih tinggi melibatkan Fe (1.87 mg/L), Ni (0.21 mg/L) dan Cu (0.88 mg/L) (Falayi 2019). Kajian Chen et al. (2011) menunjukkan tiada logam berat yang terlepas daripada bata geopolimer yang digabungkan daripada sisa GGBF. Keupayaan ini penting bagi memastikan bata yang dibangunkan berasaskan sisa khusus sisa lombong agar ia bukan sahaja berkualiti daripada aspek cirian mekanik tetapi juga memenuhi piawaian bagi aspek kesihatan terhadap penggunaannya. Selain daripada memberi manfaat terhadap sosial dan ekonomi, namun kesan buruk jangka panjang terhadap alam sekitar dan kesihatan awam tidak seharusnya diabaikan (Akabzaa 2000).

PENGEKUTAN LINEAR

Pencirian mekanik terhadap parameter pengecutan linear batu geopolimer menunjukkan nilai yang tertinggi iaitu $9.35 \pm 0.623\%$ bagi SPM0 diikuti oleh SPM5 ($7.18 \pm 0.77\%$) dan SPM10 dengan nilai $5.59 \pm 0.10\%$ (Rajah 2). Secara perbandingan, penambahan SPM sebanyak 5% (SPM5) dapat mengurangkan peratusan pengecutan linear sebanyak 23.2% jika dibandingkan dengan bata geopolimer tanpa SPM (SPM0). Nilai pengurangan peratusan pengecutan bertambah dua kali ganda sekiranya penambahan SPM kepada 10% (SPM10) iaitu 40.2%. Ini menunjukkan bahawa kehadiran SPM dapat membantu dalam menghasilkan bata yang lebih baik daripada aspek

pengecutan isi padu yang kecil akibat daripada proses pengeringan yang berlaku.

Proses pengeringan bata semasa proses geopolimerisasi membenarkan pengeluaran cecair dan menyebabkan perubahan dimensi bata (Ali Rahman et al. 2022). Pengecutan berlebihan akibat daripada proses pengeringan perlu dielakkan dan memberikan kesan kepada kualiti mekanik bata yang dihasilkan. Secara relatifnya, proses pengecutan bata di peringkat awal, kebanyakan berlaku akibat daripada proses pengeringan apabila sampel bata mengalami proses pengeluaran air daripada sampel dan pembentukan struktur yang lebih padat berlaku kesan daripada pembebasan bendalir hasil daripada aktiviti geopolimerisasi yang berlaku. Bata yang menunjukkan pengecutan yang kecil mempunyai nilai kestabilan isi padu yang lebih tinggi kerana hanya melibatkan perubahan isi padu yang kecil (Idress et al. 2023). Penambahan plastik mikro mengakibatkan nisbah pepejal/cecair, (S/L) asal berubah kerana bagi geopolimer tanpa plastik mikro, SPM0 adalah 3.51 (Jadual 4). Peningkatan kehadiran SPM menyebabkan nilai nisbah S/L campuran yang bertindak balas menyusut dan SPM hanya mengambil ruang dan merupakan sebahagian daripada komponen pepejal yang tidak bertindak balas dalam proses geopolimerisasi. Oleh itu, penambahan SPM ke dalam campuran prakursor dan pengaktif, secara tidak langsung mengurangkan nisbah S/L campuran komponen yang reaktif tersebut dalam proses geopolimerisasi. Kesan daripada pengurangan nilai nisbah S/L menyebabkan nilai pengecutan linear bagi bata geopolimer mengalami penyusutan. Pengurangan nisbah S/L akibat kehadiran komponen cecair mempengaruhi kelikatan kerana hasil campuran buburan menjadi kurang likat, selanjutnya memberikan kesan kepada pembentukan struktur bata yang lebih padat dengan kekuatan sampel geopolimer yang lebih tinggi (Castillo et al. 2021; Khale & Chudhary 2007; Xie & Kayali 2014).

JADUAL 5. Nilai bacaan bagi logam berat bagi bata geopolimer yang dikaji

Logam berat	Aras kepekatan (mg/L)	Tempoh (jam)									
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	4	8	24
		Kepekatan (mg/L)									
As	5*	0	0.8591	0.8684	0.9293	0.9874	1.0617	1.0462	1.0752	1.1822	1.2623
Fe	0.3*	0	0.0717	0.1015	0.1144	0.1419	0.1524	0.1618	0.1811	0.2429	0.2979
Mn	5**	0	0.0153	0.0175	0.0185	0.0216	0.0224	0.0234	0.0253	0.0308	0.0532
Cr	5*	0	0.0012	bdl	0.0029	0.0021	0.0026	0.0036	0.0040	0.0043	0.0049
Cu	100*	0	0.0025	0.0023	0.0024	0.0021	0.0020	0.0020	0.0023	0.0025	0.0029
Ni	1.34*	0	0.0005	0.0005	0.0007	0.0004	0.0004	0.0004	0.0005	0.0014	0.0016
Zn	500*	0	0.0135	0.0095	0.0093	0.0008	bdl	bdl	bdl	0.0008	0.0010

* United States Environmental Protection Agency (USEPA 1996)

** The Florida Center for Solid and Hazardous Waste Management (Townsend et al. 2003)

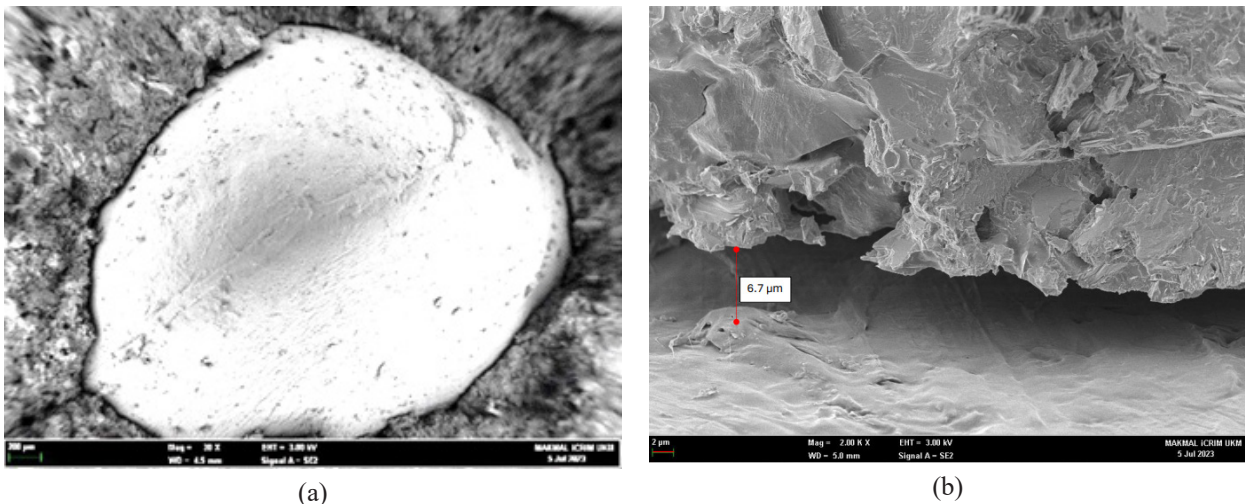
bdl Nilai di bawah had pengesanan

SERAPAN AIR

Berdasarkan parameter serakan air, penambahan SPM sebanyak 5% (SPM5) menyebabkan peningkatan yang ketara daripada 1.16% kepada 4.57% (Jadual 6). Namun peningkatan serapan air bagi pertambahan SPM daripada 5% (SPM5) kepada 10% (SPM10) hanya melibatkan peningkatan yang sedikit iaitu 7.66%.

Peningkatan serapan air kesan daripada penambahan SPM dalam campuran bata geopolimer dijelaskan daripada kehadiran ruang mikro yang wujud di sempadan di antara zarah SPM dan bahan geopolimer (Rajah 3(a)). Berdasarkan morfologi mikro yang diteliti pada imej mikroskop SEM, didapati terdapatnya, sempadan terbuka yang mengelilingi zarah SPM dengan kelebaran bukaan sekitar 0.6 nm (Rajah 3(b)). Oleh itu, semakin tinggi kandungan mikro plastik, nilai serapan air turut meningkatkan pertambahan sempadan berjarak yang terbentuk dalam bata geopolimer yang dihasilkan. Pembentukan struktur yang lebih padat pada bata geopolimer mengurangkan nilai serapan air, namun kehadiran sempadan berjarak tersebut mempengaruhi

nilai serapan air dengan berlakunya peningkatan sejajar dengan peningkatan nisbah plastik mikro. Kehadiran liang yang rendah dikaitkan dengan tahap kepadatan yang tinggi dengan keupayaan serapan air rendah merupakan ciri-ciri bagi bata yang berkualiti (Fungaro & da Silva Reis 2014). Nilai keseluruhan kadar serapan air yang diperoleh (1.16% dan 4.92%) adalah dikategorikan dalam kelas A (4.5%) dan kelas B (7.0%) bagi jenis bata kejuruteraan (MS 76: 1972). Kadar tersebut juga didapati jauh lebih baik kerana nilai penyerapan air terhadap bata tidak melebihi 15%-20% mengikut kod piawaian minimum Piawaian India, (IS 1077-1992) (Raut, Ralegaonkar & Mandavgane 2011). Sekiranya nilai serapan ini dilampaui, bata tersebut mengalami penyerapan air yang aktif dan penyusutan kekuatan yang ketara serta dikategorikan sebagai bata yang lemah (Ajam et al. 2009; Ali Rahman et al. 2021). Kadar serapan air turut dipengaruhi oleh kemolaran larutan pemangkin alkali dan saiz zarah prakursor yang digunakan kerana peningkatan kemolaran dikaitkan dengan penyusutan ketara serapan air (Leong et al. 2016; Ngo 2020; Ozbayrak et al. 2023).



RAJAH 3. Imej FESEM menunjukkan (a) kehadiran ruang yang terbentuk di antara butiran SPM dan bahan geopolimer (10,000× pembesaran) dan (b) sempadan berjarak yang terbentuk dengan anggaran jarak 6.7 μm (2000× pembesaran)

JADUAL 6. Nilai serapan air bagi bata geopolimer dengan nisbah kandungan plastik mikro berbeza (SPM)

Sampel	Serapan air (%)
SPM0	1.16 ± 0.44
SPM5	4.57 ± 0.21
SPM10	4.92 ± 0.05

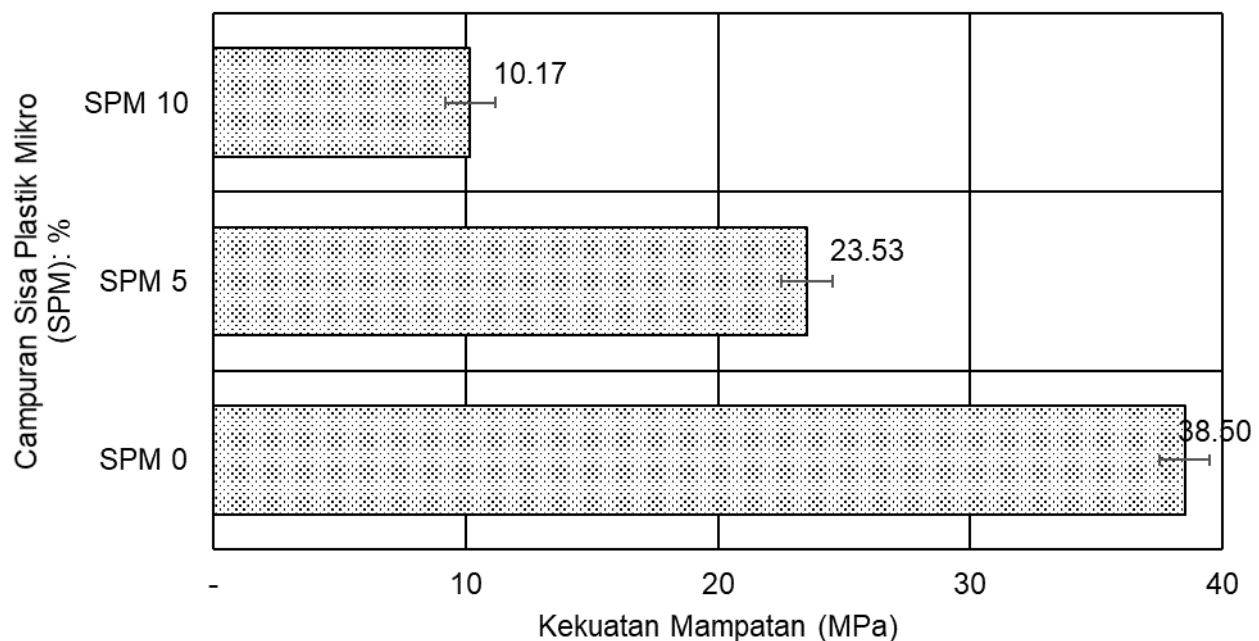
KEKUATAN MAMPATAN

Hasil penentuan kekuatan mampatan ke atas bata geopolimer dengan nisbah kandungan SPM ditunjukkan oleh Rajah 4. Hasil kajian menunjukkan nilai kekuatan mampatan bata geopolimer semakin menyusut dengan kehadiran nisbah kandungan SPM yang meningkat. Nilai kekuatan mampatan bata geopolimer SPM0 (tanpa plastik mikro) menyusut daripada 38.50 MPa kepada 23.53 MPa bagi SPM5 dan diikuti oleh SPM10 (10.17 MPa).

Penurunan nilai kekuatan mampatan menunjukkan corak penyusutan yang juga berlaku terhadap nilai ketumpatan bata geopolimer akibat daripada pertambahan nisbah kandungan SPM. Tempoh rawatan semasa proses geopolimerisasi merupakan antara faktor utama yang mempengaruhi kekuatan mampatan produk geopolimer (Adajar et al. 2021; Tian et al. 2020; Verma, Rao & Kumar 2022). Secara perbandingan, kekuatan mampatan bata geopolimer berasaskan ALE adalah lebih tinggi berbanding produk bukan geopolimer (simen portland biasa) dan boleh mencapai sehingga 10 MPa (Ali Rahman et al. 2021; Falayi 2019). Peningkatan kekuatan mampatan bata geopolimer dengan tempoh rawatan selepas 28 hari dikaitkan dengan pertambahan kehadiran amorfus yang berperanan menstabilkan amang dan komposit berbanding bahan berasaskan simen portland biasa (Pan et al. 2022).

Ini dikaitkan dengan peningkatan kandungan amorfus yang berperanan menstabilkan sisa dan kandungan komposit berasaskan geopolimer berbanding simen portland biasa. Produk geopolimer mencapai kekuatan mampatan maksimum untuk tempoh rawatan tertentu (tempoh optimum), namun nilai kekuatan mampatan tidak berubah kesan daripada peningkatan tempoh rawatan.

Penyusutan kekuatan mampatan bata geopolimer akibat penambahan nisbah SPM dikaitkan dengan kehadiran sempadan berjarak antara zarah plastik mikro dan bahan geopolimer. Ini menyebabkan kebarangkalian terbentuk sempadan antara zarah plastik mikro dan plastik mikro (P-P) dan sempadan berjarak antara zarah plastik mikro dan bahan geopolimer (P-G). Penambahan nisbah kandungan SPM boleh meningkatkan sempadan jenis P-P dan sempadan P-G tersebut. Ketiadaan jejambat ikatan yang menghubungkan antara sempadan P-G memberikan ruang untuk mampatan selanjutnya berlaku di samping membenarkan gelinciran berlaku bagi sempadan jenis P-P apabila beban dikenakan ke atas sampel geopolimer. Namun begitu, julat nilai kekuatan mampatan yang diperoleh (10.17 MPa dan 38.50 MPa) adalah tinggi dan memenuhi syarat piawaian Malaysia, bagi nilai kekuatan mampatan antara 2.8 MPa dan 5.2 MPa bagi tujuan pembinaan rumah kediaman satu dan dua tingkat (MS 76: 1972).



RAJAH 4. Nilai kekuatan mampatan bagi bata geopolimer yang dihasilkan dengan nisbah kandungan sisa plastik mikro berbeza (SPM)

KESIMPULAN

Pencirian mekanik bata geopolimer yang dihasilkan daripada sisa lombong emas (ALE) dengan gabungan nisbah berbeza kandungan sisa plastik mikro (SPM) telah dikaji secara terperinci dengan melibatkan parameter pengecutan linear, ketumpatan, serapan air, kekuatan mekanik dan rintangan terhadap asid. Hasil daripada cirian mekanik yang diperolehi, menunjukkan penambahan zarah plastik polipropilena (PP) ke dalam campuran bata geopolimer telah memberi kesan pengecutan linear terhadap isi padu sepanjang proses pengeringan sampel. Selain daripada itu, penambahan SPM dalam campuran bata juga menyebabkan berlakunya penyusutan isi padu BGP. Suatu bata yang baik menunjukkan pengecutan linear yang rendah dan kestabilan isi padu yang tinggi. Serapan air bata geopolimer pula menunjukkan kenaikan dengan penambahan kandungan SPM. Peningkatan nilai serapan air ini disebabkan oleh kehadiran sempadan berjarak yang terbentuk di antara SPM dan bahan geopolimer. Namun nilai yang diperolehi masih berada di bawah syarat yang diperlukan bagi bata kejuruteraan Kelas A (4.5%) dan Kelas B (7.0%). Demikian juga corak penyusutan bagi nilai kekuatan mampatan bata geopolimer yang berjulat antara 10.17 MPa dan 38.50 MPa. Penyusutan ini dikaitkan juga dengan kehadiran sempadan berjarak yang terbentuk di antara zarah SPM dan bahan geopolimer. Peningkatan nisbah kandungan SPM terhadap ALE turut menyebabkan kebarangkalian pembentukan sempadan berjarak meningkat dalam bata geopolimer. Peningkatan berterusan juga meningkatkan pembentukan sempadan di antara zarah SPM (jenis P-P) berbanding sempadan antara SPM dan geopolimer (jenis P-G) yang menyebabkan berlaku gelinciran di antara zarah SPM apabila mampatan dikenakan ke atas bata geopolimer. Namun nilai julat kekuatan mampatan yang didapati adalah melepasi nilai piawaian MS 76:1972 (2.8 MPa - 5.2 MPa).

PENGHARGAAN

Penulis ingin mengucapkan setinggi-tinggi terima kasih kepada Universiti Kebangsaan Malaysia atas kemudahan pembiayaan bagi menjayakan program penyelidikan ini di bawah GGP-2020-006. Penghargaan juga diberikan kepada kakitangan yang terlibat di Jabatan Sains Bumi dan Alam Sekitar, Fakulti Sains dan Teknologi UKM yang terlibat dalam membantu penyediaan dan pengujian di makmal terlibat.

RUJUKAN

- Abdul Kadir, A. & Mohajerani, A. 2008. Physico-mechanical properties and leachate analysis of clay fired bricks incorporated with cigarette butts. *Proceedings of the International Conference on Environment, Penang, Malaysia*. hlm. 15-17.
- Ajaj, L., Ben Ouedzou, M., Felfoul, H.S. & Mensi, R.E. 2009. Characterization of the Tunisian phosphogypsum and its valorization in clay bricks. *Construction and Building Materials* 23(10): 3240-3247. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.05.009>
- Akabzaa, T.M. 2000. *Boom and Dislocation: The Environmental and Social Impacts of Mining in the Wassa West District of Ghana*. Third World Network-Africa.
- Ali Rahman, Z., Nazarah, H., Idris, W.M.R. & Lihan, T. 2023. Mechanical characteristics of developed brick from drinking water sludge under different firing temperatures and rice husk ash contents. *Sains Malaysiana* 52(7): 2115-2126. <http://doi.org/10.17576/jsm-2023-5207-17>
- Ali Rahman, Z., Mohd Suhaimi, A.S., Idris, W.M.R. & Lihan, T. 2022. Developing and mechanical properties of low fired and geopolimer bricks from drinking water sludge with different contents of added fly ash. *Sains Malaysiana* 51(12): 4071-4085.
- Ali Rahman, Z., Othman, A.M., Idris, W.M.R. & Lihan, T. 2021. Kesan suhu dan bahan tambah abu terbang terhadap pencirian mekanik bata daripada sisa rawatan air mentah. *Sains Malaysiana* 50(6): 1563-1575. <http://doi.org/10.17576/jsm-2021-5006-05>
- Aragaw, T.A. 2021. Microplastic pollution in African countries' water systems: A review on findings, applied methods, characteristics, impacts, and managements. *SN Appl. Sci.* 3: 629. doi:10.1007/s42452-021-04619-z
- Abidi Ramly. 2007. Kekuatan mampatan dan keboleherapan bata tanpa bakar. Tesis Ijazah Sarjana Muda. Fakulti Kejuruteraan Awam, Universiti Teknologi Malaysia (tidak diterbitkan).
- Adajar, M.A., Beltran, H.E., Calicdan, C.A., Duran, T.R., Ramos, C.D. & Galupino, J. 2021. Assessment of gold mine tailings as based geopolimer binder in concrete. *DLSU Research Congress 2021*, De La Salle University, Manila, July 7-9, 2021.
- Adler, R. & Rascher, J. 2007. *A Strategy for the Management of Acid Mine Drainage from Gold Mines in Gauteng*. CSIR Report No. CSIR/NRE/PWER/2007/0053/C. Pretoria: CSIR.
- Ahmari, S. & Zhang, L. 2013. Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolimer bricks. *Construction and Building Materials* 44: 743-750. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.075>
- Ahmari, S. & Zhang, L. 2012. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolimerization. *Construction and Building Materials* 29: 323-331. doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.10.048

- Aseniero, J.P.J., Opiso, E.M., Banda, M.H.T. & Tabelin, C.B. 2018. Potential utilization of artisanal gold-mine tailings as geopolymeric source material: Preliminary investigation. *SN Applied Sciences* 1: 35. doi.org/10.1007/s42452-018-0045-4
- Asoy, A.N., Besagas, R.L., Del Rosario, R.M. & Dael, N.T. 2017. Physico-chemical characteristics of tailings from Gango gold mine. *J. Chem. Bio. Phy. Sci. Sec. D* 7(2): 201-207.
- Benahsina, A., El Haloui, Y., Taha, Y., Elomari, M. & Bennouna, M.A. 2022. Substitution of natural clay by Moroccan solid mining wastes to manufacture fired bricks. *Materials Today: Proceedings* 58: 1324-1330.
- Benson, C.H., Zhai, H. & Wang, X. 1994. Estimating hydraulic conductivity of compacted clay liners. *Journal of Geotechnical Engineering* 120(2): 366-387. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:2\(366\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:2(366))
- Bhuyan, M.S. 2022. Effects of microplastic on fish and in human health. *Frontier in Environmental Science* 10: 827289. doi: 10.3389/fenvs.2022.827289
- Blight, G. & Fourie, A. 2005. Catastrophe revisited-disastrous flow failures of mine and municipal solid waste. *Geotech. Geol. Eng.* 23: 219-248. doi: 10.1007/s10706-004-7067-y
- British Standard (BS). 1990. 1377-2. *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Classification Tests*. London: British Standard.
- Caballero, E., Sánchez, W. & Ríos, C.A. 2014. Synthesis of geopolymers from alkaline activation of gold mining wastes. *Ingeniería y competitividad* 16(1): 317-330.
- Carter, D., Mortland, M. & Kemper, W. 1986. Specific surface. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods* 5: 413-423.
- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P. & Palma, S. 2021. Factors affecting the compressive strength of geopolymers: A review. *Minerals* 11(12): 1317.
- Chan, C.M. 2023. *BET Physisorption Analyzer Installation Operational Training: Micromeritics Tristar II Plus, Micromeritics*.
- Chen, M-Z., Lin, J-T., Wu, S-P. & Liu, C-H. 2011. Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials* 25(4): 1532-1536.
- Davidovits, J. 2015. *Polymers and geopolymers. Geopolymer Chemistry and Applications*. 4th ed. Saint Quentin: Institut Géopolymère.
- Deng, K., Yin, P., Liu, X., Tang, Q. & Qu, R. 2014. Modeling analysis and optimization of adsorption parameters of Au(III) using low-cost agricultural residual buckwheat hulls. *J. Ind. Eng. Chem.* 20(4): 2428-2438. [http://refhub.elsevier.com/S0950-0618\(21\)00415-3/h0010](http://refhub.elsevier.com/S0950-0618(21)00415-3/h0010)
- Doğan-sağlamtimur, N., Bilgil, A. & Öztürk, B. 2018. Reusability of ashes for the building sector to strengthen the sustainability of waste management. Dlm. *Handbook of Research on Supply Chain Management for Sustainable Development*, disunting oleh Akkçük, U. IGI Global Publishing. hlm. 265-281.
- Duxson, P., Mallicoat, S.W., Lukey, G.C., Kriven, W.M. & Van Deventer, J.S. 2007. The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 292(1): 8-20.
- Falayi, T. 2019. Effect of potassium silicate and aluminate on the stabilisation of gold mine tailings. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management* 172(2): 56-63.
- Fashola, M.O., Ngole-Jeme, V.M. & Bablola, O.O. 2016. Heavy metal pollution from gold mines: Environmental effects and bacterial strategies for resistance. *International J. Environmental Research and Public Health* 13(11): 1047. <https://doi.org/10.3390%2Fijerph13111047>
- Fungaro, D.A. & da Silva Reis, T.V. 2014. Use of sugarcane straw ash for zeolite synthesis. *International Journal of Energy and Environment* 5(5): 559-566.
- Gado, R.A., Hebda, M., Lach, M. & Mikula, J. 2020. Alkali activation of waste clay bricks: Influence of the silica modulus, SiO₂/Na₂O, H₂O/Na₂O molar ratio, and liquid/soilid ratio. *Materials* 13: 383. <https://doi.org/10.3390/ma13020383>
- Gui, Y., Zhang, Q., Qin, X. & Wang, J. 2021. Influence of organic matter content on engineering properties of clays. *Advances in Civil Engineering* 2021: 1-11.
- Idrees, M., Akhbar, A., Saeed, F., Gull, M. & Eldin, S.M. 2023. Sustainable production of low-shrinkage fired clay bricks by utilizing waste plastic dust. *Alexandria Engineering Journal* 69: 405-416. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.01.040>
- Ince, C. 2019. Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. *Journal of Cleaner Production* 238: 117871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117871>
- Indian Standard (IS). 1992. IS 1077:1992. *Common Burnt Clay Building Bricks-Specifications*. New Delhi: BIS:1992 [Fifth Revision]
- Jabatan Perangkaan Malaysia 2022. Indeks kos bahan binaan meningkat di antara 4.4 peratus dan 18.5 peratus pada Jun 2022. *Berita Harian online*. <https://beritaharian.my/indeks-kos-bahan-binaan-meningkat-di-antara-4-4-peratus-dan-18-5-peratus-pada-jun-2022/>

- Kementerian Air dan Sumber Asli 2021. *Malaysia Plastics Sustainability Roadmap 2021-2030*. Putrajaya: Ministry of Environment & Water (KASA).
- Khale, D. & Chaudhary, R. 2007. Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. *Journal of Materials Science* 42(3): 729-746.
- Leong, H.Y., Ong, D.E.L., Sanjayan, J.G. & Ali Nazari. 2016. The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer. *Construct. Build. Mater.* 106: 500-511.
- Loaiza, J.V., Franco, J.A., Vargas, L.S., Gongora, G.A. & Dianderas, A.P.F. 2020. Design and implementation of an alternative process for the manufacture of bricks from gold mine tailings. *Ingeniare. Revista Chilena De Ingeniería* 28(2): 268-276.
- Lottermoser, B.G. 2010. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-12419-8>
- Lu, Y., Li, G., Liu, W., Yuan, H. & Xiao, D. 2018. The application of microwave digestion in decomposing some refractory ore sample with solid fusion agent. *Talanta* 186: 538-544. [http://refhub.elsevier.com/S0950-0618\(21\)00415-3/h0010](http://refhub.elsevier.com/S0950-0618(21)00415-3/h0010)
- Lu, Z. & Cai, M. 2012. Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining. *Procedia Environmental Sciences* 16: 715-721.
- Mabroum, S., Moukannaa, S., Machi, A.E., Taha, Y., Benzaazouna, M. & Hakkou, R. 2021. Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology* 1: 100014.
- Malaysian Standard (MS). 76. 1972. *Specification for Bricks and Blocks of Fired Brick Earth, Clay or Shale (Selangor: Malaysian Standard)*. hlm. 1-74.
- Mashifana, T., Sithole, N. & Mkhonto, E. 2019. Stabilization of gold mine tailings: The effect of hydrated lime on the unconfined compressive strength. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. hlm. 012045.
- Nehdi, M. & Tariq, A. 2007. Stabilization of sulphidic mine tailings for prevention of metal release and acid drainage using cementitious materials: A review. *Journal of Environ. Eng. Sci.* 6: 423-436.
- Ngo, S.H. 2020. Evaluation of the engineering properties of fly ash-based geopolymer bricks. *International Journal of Civil Engineering and Technology* 11(2): 43-51.
- Oades, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability: Mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* 76: 319-337.
- Özbayrak, A., Kucukgoncu, H., Aslanbay, H.H., Aslanbay, Y.G. & Atas, O. 2023. Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios. *J. Build. Eng.* 68: 106108.
- Pan, Z., Zhang, C., Li, Y. & Yang, C. 2022. Solidification/stabilization of gold ore tailings powder using sustainable waste-based composite geopolymer. *Engineering Geology* 309: 106793.
- Parthasarathi, N., Ramalinga Reddy, B.M. & Satyanarayan, K.S. 2016. Effect on workability of concrete due to partial replacement of natural sand with gold mine tailing. *Indian Journal of Science & Technology* 9(35): 1-4. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i35/99052>
- PlasticsEurope. 2019. *Plastics e the Facts 2019*. <https://www.plasticseurope.org/en/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>
- Rao, F. & Liu, Q. 2015. Geopolymerization and its potential application in mine tailings consolidation: A review. *An International Journal* 36(6): 399-409. doi:10.1080/08827508.2015.1055625
- Rassam, D.W. & Williams, D.J. 1999. Engineering properties of gold tailings. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 13(3): 91-96.
- Raut, S., Ralegaonkar, R. & Mandavgane, S. 2011. Development of sustainable construction material using industrial and agricultural solid waste: A review of waste-create bricks. *Construction and Building Materials* 25(10): 4037-4042.
- Raza Ali Khan, Mohd Shahir Liew & Zulkipli Ghazali. 2014. Malaysian construction sector and Malaysia vision 2020: Developed nation status. *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 109: 507-513.
- Rouquerol, J., Rouquerol, F., Llewellyn, P., Maurin, G. & Sing, K. 2013. *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications*. Massachusetts: Academic Press.
- Roy, S., Adhikari & Gupta, R.M. 2007. Use of gold mill tailing in making bricks: A feasibility study. *Waste Management Research* 25: 474-482.
- Suhendro, B. 2014. Toward green concrete for better sustainable environment. *Procedia Engineering* 95: 305-320.
- Tian, X., Xu, W., Song, S., Rao, F. & Xia, L. 2020. Effects of curing temperature on the compressive strength and microstructure of copper tailing-based geopolymers. *Chemosphere* 253: 126754. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126754>
- Townsend, T.G., Solo-Gabriele, H., Tolaymat, T. & Stook, K. 2003. Impact of chromated copper arsenate (CCA) in wood mulch. *Science of The Total Environment* 309(1-3): 173-185.

- US Environmental Protection Agency (USEPA). 1996. *Hazardous Waste Characteristics Scoping Study*. US Environmental Protection Agency.
- Uvarajan, T., Paran Gani, Ng, C. C. & Nur Hanis Zulkernain. 2021. Reusing plastic waste in the production of bricks and paving blocks: A review. *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 1-34.
- Verma, N.K., Rao, M.C. & Kumar, S. 2022. Effect of curing regime on compressive strength of geopolymer concrete. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science* 982: 012032. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/982/1/012031>
- Wei, Z., Zhao, J., Wang, W., Yang, Y., Zhuang, S., Lu, T. & Hou, Z. 2021. Utilizing gold mine tailings to produce sintered bricks. *Construction and Building Materials* 282: 122655.
- Widjoko, L., Hardjasaputra, H. & Susilowati. 2014. Study of gold mine tailings utilization as fine aggregate material for producing shotcrete based on concept of green technology. *3rd International Conference of Engineering & Technology Development (ICETD)*, Faculty of Computer Science, Bandar Lampung University.
- Xie, J. & Kayali, O. 2014. Effect of initial water content and curing moisture conditions on the development of fly ash-based geopolymers in heat and ambient temperature. *Constr. Build. Mater.* 67: 20-28.
- Yadav, A., Chandra, A. & Singh, S. 2022. Study on application of waste plastic in the construction industry. *Materials Today: Proceedings* 64: 1455-1458.
- Yang, C., Cui, C., Qin, J. & Cui, X. 2014. Characteristics of the fired bricks with low-silicon iron tailings. *Construction and Building Materials* 70: 36-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.075>
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H. & Chen, Y. 2009. Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta* 493(1): 49-54.
- Yener, E. & Karaaslan, C. 2020. Curing time and temperature effect on the resistance to wet-dry cycles of fly ash added pumice based geopolymer. *Cement Based Composites* 1(2): 19-25.
- Yunsheng, Z., Wei, S., Qianli, C. & Lin, C. 2007. Synthesis and heavy metal immobilization behaviors of slag based geopolymer. *Journal of Hazardous Materials* 143(1-2): 206-213.

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: zarah1970@ukm.edu.my