

**SINTESIS DAN KARAKTERISTIK *FOAM GLASS-CERAMIC*
BERBAHAN BAKU LIMBAH PADAT ABU TERBANG BATUBARA,
LIMBAH KACA DAN BATUAN BASAL**

(Tesis)

**Oleh
KUSNO ISNUGROHO
1927041006**



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

ABSTRAK

SINTESIS DAN KARAKTERISTIK *FOAM GLASS-CERAMIC* BERBAHAN BAKU LIMBAH PADAT ABU TERBANG BATUBARA, LIMBAH KACA DAN BATUAN BASAL

Oleh

KUSNO ISNUGROHO

Telah dilakukan penelitian dalam upaya peningkatan nilai tambah limbah padat industri menjadi produk *foam glass-ceramic*. Limbah padat industri yang digunakan sebagai bahan baku *foam glass-ceramic* adalah abu terbang batubara, limbah kaca dan batuan basal. Limbah pengecoran aluminium berupa aluminium *dross* digunakan sebagai *foaming agent*. Proses pembuatan *foam glass-ceramic* dilakukan dengan metode pemanasan serbuk dengan suhu *sintering* 1.000, 1.050 dan 1.100°C dengan waktu penahanan selama 30 menit. Variasi komposisi dilakukan dengan perbandingan persentase berat matrik keramik : *foaming agent* berturut turut adalah 97,5:2,5 ; 95:5 ; 92,5:7,5 ; 90:10 dan komposisi tanpa penambahan *foaming agent*. Untuk mengetahui morfologi *foam glass-ceramic* yang terbentuk dilakukan karakterisasi FESEM. Sedangkan untuk mengetahui komposisi kimia dan kristalisasi yang terbentuk dilakukan dengan analisis XRF dan XRD. Selain itu untuk mendapatkan nilai kuat tekan dilakukan analisis menggunakan *Universal Testing Machine*, nilai densitas dianalisis dengan metode Archimedes. Dari hasil penelitian diperoleh nilai densitas terendah 0,562 g/cm³ dicapai pada penambahan 5% berat aluminium *dross* pada suhu *sintering* 1.050°C, dan nilai kuat tekan terbesar 1,87 MPa, diperoleh dengan penambahan 2,5% berat aluminium *dross* pada suhu *sintering* 1.000°C.

Kata kunci: *foam glass-ceramic*, abu terbang, basal, aluminium, *sintering*

ABSTRACT

SYNTHESIS AND CHARACTERISTICS OF FOAM GLASS-CERAMIC FROM SOLID WASTE; COAL FLY ASH, GLASS BOTTLES AND BASALT ROCK

By

KUSNO ISNUGROHO

This research was conducted to increase the added value of industrial solid waste into foam glass-ceramic products. Industrial solid waste used as raw material for glass-ceramic foam were coal fly ash, glass bottles and basalt rock. Aluminum casting waste in the form of aluminum dross was used as a foaming agent. The process of making foam glass-ceramic was carried out by heating the powder with a sintering temperature of 1,000, 1,050 and 1,100°C with a holding time of 30 minutes. Variation of the composition was carried out by comparing the percentage by weight of the ceramic matrix: foaming agent respectively 97.5:2.5; 95:5; 92.5:7.5; 90:10 and the composition without the addition of a foaming agent. To determine the morphology of the foam glass-ceramic, FESEM characterization was carried out. Meanwhile, to find out the chemical composition and crystallization XRF and XRD analysis were carried out. In addition to obtaining compressive strength values, an analysis was carried out using a Universal Testing Machine, and the density that occurred was analyzed using the Archimedes method. The results shows that the lowest density value of 0.562 g/cm³ was achieved by adding 5% aluminum dross at a sintering temperature of 1,050°C, and the highest compressive strength value was 1.87 MPa, obtained by adding 2.5% by weight aluminum dross at a sintering temperature of 1,000°C.

Key words: foam glass-ceramic, coal fly ash, basalt, aluminium, sintering

**SINTESIS DAN KARAKTERISTIK *FOAM GLASS-CERAMIC*
BERBAHAN BAKU LIMBAH PADAT ABU TERBANG BATUBARA,
LIMBAH KACA DAN BATUAN BASAL**

Oleh
KUSNO ISNUGROHO
1927041006

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
MAGISTER SAINS

Pada

**Program Studi Magister Fisika
Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2023**

Judul : **Sintesis dan Karakteristik *Foam Glass Ceramic* Berbahan Baku Limbah Padat Abu Terbang Batubara, Limbah Kaca dan Batuan Basal**

Nama : **Kusno Isnugroho**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1927041006**

Jurusan : **Fisika**

Program Studi : **Magister Fisika**

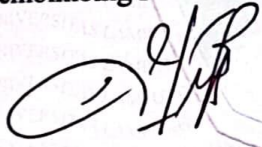
Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

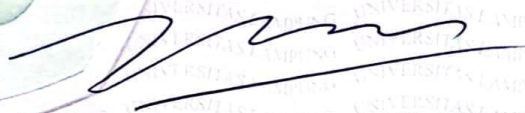
MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II


Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.
NIP. 196312281986102001

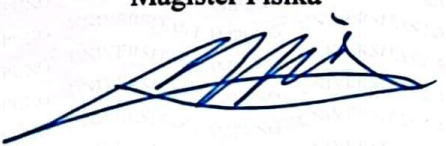

Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.
NIP. 195903081991031001

2. Mengetahui

Ketua Jurusan Fisika

Ketua Program Studi
Magister Fisika


Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T.
NIP. 198010102005011002


Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.
NIP. 198206182008121001


MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

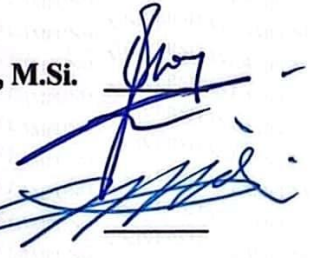
Ketua : Dra. Dwi Asmi M.Si., Ph.D.



Sekretaris : Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.



Penguji Anggota : 1. Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si.



2. Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
NIP. 197110012005011002

3. Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 16 Juni 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam tesis ini yang berjudul **“SINTESIS DAN KARAKTERISTIK FOAM GLASS-CERAMIC BERBAHAN BAKU LIMBAH PADAT ABU TERBANG BATUBARA, LIMBAH KACA DAN BATUAN BASAL”** tidak terdapat karya orang lain yang sama persis. Sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang ditulis, kecuali yang diacu dalam naskah ini disebutkan dalam daftar pustaka. Saya menyatakan pula bahwa tesis ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila pernyataan saya tidak benar maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Banda Lampung, 17 Juni 2023



Kusno Ishugroho
NPM. 1927041006

RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di kota Depok, Jawa Barat pada tanggal 29 April 1980. Lahir dari pasangan Bapak Alm. Soeparto dan Ibu Genu sebagai bungsu dari tujuh bersaudara. Saat ini telah menikah dengan seorang istri Tiara Nirmala dan dikarunia enam orang anak. Penulis menempuh pendidikan formal di SDN Anyelir 1 lulus tahun 1992, SMPN 2 Depok lulus tahun 1995, dan SMUN 38 Jakarta lulus pada tahun 1998. Penulis melanjutkan studi Strata 1 di jurusan Teknik Kimia Universitas Diponegoro lulus tahun 2003 dan melanjutkan studi Magister di Program Magister Fisika Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Lampung dan lulus pada tahun 2023 dengan judul penelitian Sintesis dan Karakteristik *Foam Glass- Ceramic* Berbahan Baku Limbah Padat Abu Terbang Batubara, Limbah Kaca dan Batuan Basal

MOTTO

بَالِغُ اللَّهِ إِنَّ حَسْبَهُ فَهُوَ اللَّهُ عَلَى يَتَوَكَّلْ وَمَنْ يَحْتَسِبُ لَا حَيْثُ مِنْ وَيَرْزُقُهُ
قَدَرًا شَيْءٍ لِكُلِّ اللَّهُ جَعَلَ قَدْ أَمْرِهِ

dan Dia memberinya rezeki dari arah yang tidak disangka-sangkanya. Dan barangsiapa bertawakal kepada Allah, niscaya Allah akan mencukupkan (keperluan)nya. Sesungguhnya Allah melaksanakan urusan-Nya. Sungguh, Allah telah mengadakan ketentuan bagi setiap sesuatu. (QS.At-Talaq: 3).

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmannirrahiim

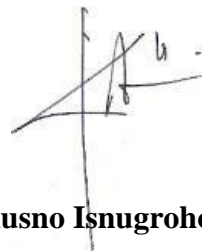
*Allahumma shalli alaa Muhammadinin 'abdika wa rosulika nabiyyil ummi
wa'ala aalihii wa sallim.*

Dengan penuh rasa sayang saya persembahkan karya tulis ilmiah ini untuk keluarga saya terutama orang tua, istri, sanak saudara dan anak-anak saya.

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah rabbi'l alamin. Segala puji hanya milik Allah SWT atas limpahan rahmat, kesehatan dan pertolongan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis yang berjudul "SINTESIS DAN KARAKTERISTIK FOAM GLASS-CERAMIC BERBAHAN BAKU LIMBAH PADAT ABU TERBANG BATUBARA, LIMBAH KACA DAN BATUAN BASAL". Adapun tujuan utama penulisan tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar Magister Sains dari Universitas Lampung. Penulis menyadari dalam penulisan tesis ini masih banyak kekurangan dalam penulisan dan penyusunan, oleh karena itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun. Akhir kata, semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi semua.

Bandar Lampung, 17 Juni 2023



Kusno Isnugroho

SANWACANA

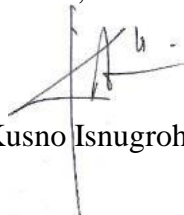
Puji syukur kehadiran Allah SWT, Rabb semesta alam yang menciptakan langit dan bumi serta penguasa atas semua makhluk. Alhamdulillah penulis masih diberikan kesempatan untuk mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah banyak membantu dalam penyelesaian penelitian dan penulisan tesis ini, maka penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Orang tua saya, Bapak Alm. Soeparto dan Ibu Genu yang selalu mendoakan saya.
2. Istri saya, Tiara Nirmala, Ibu mertua saya, Siti Sumarni dan anak-anak saya (Nabil, Abi, Alifah, Alesha, Azzam dan Aira) yang selalu memberikan keceriaan di kehidupan saya.
3. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D., sebagai pembimbing I dan pembimbing akademik yang telah memberikan bimbingan selama penelitian dan memberikan arahan dan nasehat serta kesabarannya dalam membimbing saya untuk menyelesaikan tesis ini.
4. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D., sebagai pembimbing II yang telah memberikan bimbingan selama penelitian dan memberikan arahan dalam penyelesaian tesis ini.
5. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S.Si., M.Si., sebagai penguji I yang telah memberi kritik dan saran kepada penulis selama penulisan tesis

6. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc., sebagai penguji II yang telah memberi kritik dan saran kepada penulis selama penulisan tesis.
7. Ibu Rektor Universitas Lampung Prof. Dr. Prof. Dr. Ir Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M.,
8. Bapak Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si.
9. Bapak Direktur Program Pascasarjana Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
10. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T, selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
11. Bapak Dr. Junaidi, S.Si., M.Sc., selaku Ketua Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
12. Teman teman satu angkatan 2019 Pascasarjana Fisika Universitas Lampung.
13. Bapak Dr. Anggoro Tri Mursito., selaku Kepala Pusat Teknologi Pertambangan BRIN Lampung.
14. Para civitas pegawai di Pusat Teknologi Pertambangan BRIN Lampung.

Bandar Lampung, 17 Juni 2023

Penulis,



Kusno Isnugroho

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
HALAMAN JUDUL	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
HALAMAN PENGESAHAN.....	vi
HALAMAN PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
HALAMAN PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI.....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Batasan Masalah	6
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 <i>State of The Art</i>	8
2.2 Limbah Pembakaran Batubara PLTU (Abu Terbang)	10
2.3 Batuan Basal	13

2.4 Limbah Pengecoran Aluminium (<i>Aluminium Dross</i>).....	16
2.5 Limbah Kaca.....	17
2.6 <i>Foam Glass-Ceramic</i>	21
2.7 Karakterisasi Sampel	30
III. METODE PENELITIAN	47
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	47
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	47
3.3 Proses Pembuatan <i>Foam Glass-Ceramic</i>	48
3.4 Karakterisasi XRF, XRD, Uji Fisis, Uji Mekanik dan FESEM	52
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	58
4.2 Komposisi Senyawa Kimia Bahan Baku <i>Foam Glass-Ceramic</i>	581
4.2 Karakterisasi Stuktur Bahan Baku <i>Foam Glass-Ceramic</i>	60
4.3 Uji Densitas <i>Foam Glass-Ceramic</i>	69
4.4 Uji Porositas <i>Foam Glass-Ceramic</i>	71
4.5 Uji Kuat Tekan <i>Foam Glass-Ceramic</i>	73
4.6 Analisis Struktur Sampel <i>Foam Glass-Ceramic</i> Menggunakan XRD	74
4.7 Analisis Mikrostruktur <i>Foam Glass-Ceramic</i> Menggunakan FESEM.....	81
V. KESIMPULAN DAN SARAN	91
5.1 Kesimpulan	91
5.2 Saran	91

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kenampakan singkapan batuan basal (Adiyatma <i>et al</i> , 2019).....	13
Gambar 2.2. Grafik klasifikasi batuan beku (Le Bas and Streckeisen, 1991).....	14
Gambar 2.3. Alur pembuatan foam glass-ceramic (Zhang <i>et al</i> , 2020).	24
Gambar 2.4. Proses terjadinya sinar-X (Puglia, 2021).	32
Gambar 2.5. Kerja alat X-ray diffraction (Jamaludin, 2010).	34
Gambar 2.6. Diagram sudut pada Hukum Bragg (Fahlepy, 2022).....	36
Gambar 2.7. Alat uji porositas (Sulardjaka <i>et al</i> , 2013).....	42
Gambar 2.8. Skema diagram mesin UTM (Johri <i>et al</i> , 2018).	43
Gambar 2.9. Skema diagram mesin FESEM (Inkson, 2016).	46
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian	51
Gambar 3.2. Pola XRD dari foam glass-ceramic yang dipanaskan pada berbagai suhu (Saparuddin <i>et al</i> , 2020).	53
Gambar 3.3. Hasil densitas dan porositas foam glass-ceramic dipanaskan pada berbagai suhu selama 60 menit (Saparuddin <i>et al</i> , 2020).	55
Gambar 3.4. Hasil FESEM foam glass-ceramic yang dipanaskan pada suhu (a) 700°C (b) 800°C (Saparuddin <i>et al</i> , 2020).....	57
Gambar 4.1. Hasil karakterisasi XRD batuan basal.	60
Gambar 4.2. Hasil karakterisasi XRD abu terbang batubara.....	63
Gambar 4.3. Hasil karakterisasi XRD limbah botol kaca.....	66
Gambar 4.4. Hasil karakterisasi XRD aluminium <i>dross</i>	67
Gambar 4.5. Hasil uji densitas <i>foam glass-ceramic</i>	69
Gambar 4.6. Hasil uji porositas <i>foam glass-ceramic</i>	71
Gambar 4.7. Hasil uji kuat tekan <i>foam glass-ceramic</i>	73
Gambar 4.8. Hasil karakterisasi XRD <i>foam glass-ceramic</i> pada pemanasan suhu 1.000°C.	74
Gambar 4.9. Hasil karakterisasi XRD <i>foam glass-ceramic</i> pada pemanasan suhu 1.050°C.	76
Gambar 4.10. Hasil karakterisasi XRD <i>foam glass-ceramic</i> pada pemanasan suhu 1.100°C.	77
Gambar 4.11. Morfologi sampel <i>foam glass-ceramic</i> tanpa penambahan aluminium <i>dross</i> (FG0) dengan suhu <i>sintering</i> : (a). 1.000°C, (b). 1.050°C, dan (c). 1.100°C.	81
Gambar 4.12. Morfologi sampel <i>foam glass-ceramic</i> dengan penambahan 2,5% berat aluminium <i>dross</i> (FG2,5) dengan suhu <i>sintering</i> : (a). 1.000°C, (b). 1.050°C, dan (c). 1.100°C.	83

Gambar 4.13. Morfologi sampel <i>foam glass-ceramic</i> dengan penambahan 5% berat aluminium <i>dross</i> (FG5) dengan suhu <i>sintering</i> : (a). 1.000°C, (b). 1.050°C, dan (c). 1.100°C.	85
Gambar 4.14. Morfologi sampel <i>foam glass-ceramic</i> dengan penambahan 7,5% berat aluminium <i>dross</i> (FG7,5) dengan suhu <i>sintering</i> : (a). 1.000°C, (b). 1.050°C, dan (c). 1.100°C.	87
Gambar 4.15. Morfologi sampel <i>foam glass-ceramic</i> dengan penambahan 10% berat aluminium <i>dross</i> (FG10) dengan suhu <i>sintering</i> : (a). 1.000°C, (b). 1.050°C, dan (c). 1.100°C.	89

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Komposisi Campuran Bahan	49
Tabel 4.1. Hasil analisis XRF bahan baku foam glass-ceramic	58
Tabel 4.2. Interpretasi XRD puncak tertinggi fasa kristalin pada basal berdasarkan 2θ	61
Tabel 4.3. Interpretasi XRD puncak tertinggi fasa kristalin pada abu terbang batubara berdasarkan 2θ	65
Tabel 4.4. Interpretasi XRD puncak tertinggi fasa kristalin pada aluminium <i>dross</i> berdasarkan 2θ	68
Tabel 4.5. Intesitas puncak difraksi tertinggi pada posisi $2\theta(^{\circ})$ suhu 1.000°C ...	75
Tabel 4.6. Intensitas puncak difraksi tertinggi pada posisi $2\theta(^{\circ})$ suhu 1.050°C .	77
Tabel 4.7. Intensitas puncak difraksi tertinggi pada posisi $2\theta(^{\circ})$ suhu 1.100°C .	78
Tabel 4.8. Ukuran diameter pori rata-rata sampel <i>foam glass-ceramic</i> FG0	82
Tabel 4.9. Ukuran diameter pori rata-rata sampel <i>foam glass-ceramic</i> FG2,5 ...	84
Tabel 4.10. Ukuran diameter pori rata-rata sampel <i>foam glass-ceramic</i> FG5	86
Tabel 4.11. Ukuran diameter pori rata-rata sampel <i>foam glass-ceramic</i> FG7,5 .	88
Tabel 4.12. Ukuran diameter pori rata-rata sampel <i>foam glass-ceramic</i> FG10 ..	90

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) tidak hanya menghasilkan energi listrik namun juga menghasilkan limbah abu sisa pembakaran berupa material-material yang terbang dan terendapkan, yang terbang disebut abu terbang dan yang di bawah adalah abu dasar. Secara nasional, realisasi kebutuhan batubara nasional pada tahun 2022 mencapai 206 juta ton (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2022). Proses pembakaran batubara diperkirakan menghasilkan limbah pembakaran batubara mencapai 5% dari jumlah total batubara yang dibakar (Anggara *et al*, 2021). Berdasarkan nilai persentase tersebut (5%), diperkirakan terdapat limbah pembakaran batubara sebanyak 10,3 juta ton pada tahun 2022.

Potensi limbah pembakaran ini ternyata belum dimanfaatkan secara maksimal, pemanfaatan limbah abu terbang di dunia baru mencapai 25% dari jumlah total abu batubara yang dihasilkan, 75% sisanya masih terbuang percuma, sebagai limbah dan polusi (Sommerville *et al*, 2013; Blissett dan Rowson, 2012). Pemanfaatan limbah abu terbang terbesar digunakan pada bidang konstruksi terutama pada pembuatan semen dan beton sebanyak 44,19%; 15,25% pembuatan jalan dan tanggul; 12,49% digunakan sebagai pengisi tanah pada reklamasi

dataran rendah; 8,84% material pengisi pada tambang bawah tanah, pembuatan batubata, balok dan ubin sebesar 7,61%, sementara pemanfaatan abu terbang di bidang pertanian masih relatif kecil yaitu 2,47% dan untuk bidang lainnya sebesar 9,14% (Loya dan Rawani, 2014). Jika diturunkan dalam tingkatan daerah, terdapat beberapa PLTU berbahan bakar batubara di Provinsi Lampung. Salah satunya PLTU Sebalang, yang menghasilkan abu terbang sebanyak 35.428 ton/tahun (Bagaskara, 2018). Penelitian pemanfaatan limbah abu terbang telah menarik minat banyak peneliti, dikarenakan limbah abu terbang dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan material yang memiliki sifat insulasi. Material tersebut dapat berupa *foam glass-ceramic*, berbahan dasar limbah abu terbang, maupun kombinasi dengan material lainnya seperti kaca atau limbah kaca.

Limbah kaca merupakan sampah atau limbah dari sisa penggunaan produk berbahan kaca. Limbah kaca termasuk sampah padat dan sampah anorganik, yang tidak mudah terurai, bahkan tidak dapat diurai secara alami oleh mikroorganisme. Sampah jenis ini memerlukan waktu hingga 1 juta tahun untuk terurai sepenuhnya jika tidak segera di daur ulang (Sylvia dan Mahmudah, 2018). Limbah kaca ditemukan dalam bentuk pecahan botol kaca, piring kaca, gelas kaca, pecahan kaca lembaran dan sebagainya. Pemanfaatan limbah kaca di Indonesia masih sangat terbatas. Limbah kaca digunakan sebagai campuran bahan baku dalam industri pembuatan kaca. Limbah kaca juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku ornamen atau kerajinan tangan. Selain itu limbah kaca dapat memiliki nilai tambah dengan menjadikannya material berpori seperti *foam glass-ceramic*.

Foam glass-ceramic adalah suatu material berpori yang memiliki sifat ringan dengan kekuatan tinggi, mampu menyerap panas, meredam suara dan memiliki porositas hingga 90 %. *Foam glass-ceramic* memiliki kombinasi sifat yang unik; ringan, kaku, tahan terhadap tekanan, tidak mudah terbakar, tahan beku, tahan terhadap uap air, tidak beracun, tahan terhadap hewan pengerat, serangga, bakteri, dan tahan air. Penelitian terkait pembuatan *foam glass-ceramic* dengan berbagai bahan baku (terak tanur tiup, kaca, limbah kaca, terak metalurgi, abu terbang, abu dasar batubara, lumpur merah limbah pengolahan bauksit, tanah diatom) telah banyak dilakukan dan masih terus berkembang sampai dengan saat ini (Sun dan Wang, 2017; Attila *et al*, 2013; Monich *et al*, 2018; Ponsot dan Bernardo, 2013; Fernandes *et al*, 2009; Francis *et al*, 2013; Sedlacík *et al*, 2022).

Dalam pembuatan *foam glass-ceramic* ditambahkan *foaming agent* yang berfungsi sebagai bahan imbuhan untuk penambahan gas atau zat yang mampu menghasilkan gas pada saat proses pemanasan. Gas tersebut akan terjerembab di dalam sel-sel lelehan gelas, sehingga ketika proses pendinginan lelehan gelas, terdapat pori dalam gelas tersebut. *Foaming agent* seperti karbon (grafit, karbon hitam), silikon karbida (SiC), karbonat (CaCO_3 , SrCO_3), dolomit, kalsit, marmer, *dross*, *water-glass*, MnO_2 , sulfat (CaSO_4), natrium hidrokisda (NaOH), tulang babi bahkan cangkang kulit telur, dapat digunakan pada proses pembuatan *foam glass-ceramic* (Fernandes *et al*, 2009; König *et al*, 2014; Shi *et al*, 2016; Sihombing *et al*, 2016; Saparuddin, 2020). Penelitian terkait *foam glass-ceramic* terus berkembang untuk mendapatkan sumber bahan baku dengan harga murah serta ketersediaannya yang melimpah.

Batuan basal menarik untuk dikaji lebih mendalam lagi. Selain ketersediaannya yang melimpah dan tersebar hampir di seluruh Indonesia, batuan basal ternyata belum dimanfaatkan secara optimal. Secara umum, lelehan batu pijar yang mengalir keluar dari dalam bumi (lava), merupakan pembentuk batuan vulkanik permukaan di seluruh dunia, tetapi hanya sebagian kecil yang membeku menjadi batuan basal, sisanya membeku menjadi struktur batuan yang lain seperti basal-andesit, andesit ataupun batuan beku jenis gabbro, dikarenakan kondisi pendinginannya dan kondisi lain yang memengaruhi seperti mineral ikutan disepanjang aliran dan tekanan yang terjadi saat pembekuan.

Batuan basal banyak ditemukan di permukaan dasar laut dengan sebagian terbentuk didaratan seperti di Mauna Loa Hawaii, Carrizozo New Mexico, Laki Iceland, Undara Australia hingga Roza Columbia river North America dengan total deposit volume melebihi 2.000 km³ (Swanson *et al*, 1975; Longo, 1984). Dari penelitian yang dilakukan oleh Isnugroho *et al*, (2018) diketahui bahwa batuan basal di Provinsi Lampung dapat ditemukan di kecamatan Mataram Baru, Jabung, Bumi Agung, Marga Tiga, Sukadana, dan Labuhan Maringgai dimana merupakan bagian dari Kabupaten Lampung Timur dengan total kandungan mencapai 10 juta m³.

Pemanfaatan batuan basal di Indonesia khususnya di Provinsi Lampung relatif terbatas. Lebih banyak digunakan pada bidang konstruksi (bahan bangunan), pembuatan jalan, jembatan, gedung, dan sebagainya. Pengolahannya relatif sederhana hanya menggunakan *size reduction (Quarry Stone Crusher)* (Isnugroho *et al*, 2018). Seperti batuan dengan ukuran besar sebagai batu pondasi, batu split

digunakan sebagai agregat pada pembuatan beton, sedangkan yang berbentuk pasir sebagai bahan campuran pada aspal dan paving. Selain sebagai bahan bangunan di bidang konstruksi, ternyata olahan batuan basal memiliki potensi kegunaan yang cukup penting diberbagai bidang industri. Batuan basal dapat digunakan pada industri penerbangan, otomotif, perkapalan, pertambangan, militer dan pertanian (Zongwen *et al*, 2018).

Penelitian-penelitian sebelumnya menyatakan batuan basal dapat digunakan sebagai bahan baku pembuatan *glass-ceramics*. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam batuan basal terdapat senyawa atau unsur yang berkontribusi untuk membentuk fase keramik. Berdasarkan alasan tersebut, maka penelitian terkait pembuatan *foam glass-ceramic* berbasis bahan baku limbah abu terbang, batuan basal, dan limbah kaca perlu dilakukan karena memiliki keterbaruan secara ilmiah. Keterbaruan penelitian yang akan dilakukan terdapat pada modifikasi komposisi penggunaan limbah abu terbang, batuan basal dan limbah kaca menggunakan *foaming agent* berbasis limbah pengecoran aluminium (*aluminium dross*). Belum adanya penelitian terkait komposisi tersebut, diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi referensi dalam hal pembuatan *foam glass-ceramic* berbasis bahan baku limbah padat.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan dalam pemanfaatan abu terbang, limbah kaca dan batuan basal sebagai bahan baku *foam glass-ceramic* dengan parameter suhu pemanasan adalah bagaimana pengaruh penambahan *foaming agent* terhadap sifat fisis (densitas dan porositas), dan sifat mekanik berupa uji kuat tekan. Produk *foam glass-ceramic*

yang dihasilkan akan dikarakterisasi menggunakan, *X-ray diffraction Analysis (XRD)*, *X-ray Fluorescence (XRF)*, dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)*. *Universal Testing Machine (UTM)* digunakan untuk uji kuat tekan.

1.3 Batasan Masalah

Pemanfaatan bahan baku limbah padat (abu terbang, botol kaca, basal dan aluminium *dross*) sebagai bahan baku pembuatan *foam glass-ceramic*, memiliki beberapa batasan masalah agar menjadi lebih spesifik dan terarah, yaitu:

- 1 Proses pembuatan *foam glass-ceramic* menggunakan metode pemanasan serbuk pada suhu 1.000, 1.050 dan 1.100°C.
- 2 Komposisi campuran bahan baku adalah abu terbang, limbah kaca, batu basal dan aluminium *dross* dengan memvariasikan penambahan aluminium *dross* sebesar 2,5; 5; 7,5 dan 10%, sementara perbandingan antara abu terbang: limbah kaca: batu basal adalah 8:11:1.
- 3 Waktu tahan pemanasan pada masing-masing suhu dilakukan selama 30 menit.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

- 1 Tujuan umum penelitian ini yaitu diperolehnya teknologi proses pembuatan *foam glass-ceramic* berbasis bahan baku limbah padat.
- 2 Tujuan khusus penelitian ini untuk mengetahui pengaruh penambahan aluminium *dross* sebagai *foaming agent* pada proses pemanasan serbuk dengan suhu 1.000, 1.050, dan 1.100°C terhadap: sifat fisis (densitas,

porositas), sifat mekanis (kuat tekan) dan morfologi dari *foam glass-ceramic* yang terbentuk.

Manfaat dari penelitian ini adalah meningkatkan nilai tambah limbah industri abu terbang pembakaran batubara PLTU Sebalang dan batuan basal yang ada di Provinsi Lampung menjadi produk *foam glass-ceramic*. Penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan sebagai alternatif teknologi proses pemanfaatan limbah abu terbang, sekaligus menjawab tantangan terbitnya Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup yang mengeluarkan abu terbang dari limbah bahan berbahaya dan beracun (B3) menjadi non B3.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of The Art*

Studi literatur dilakukan untuk analisis dan memperkaya pembahasan penelitian serta membedakan penelitian sebelumnya dengan penelitian yang akan dilakukan. Penelitian terkait kombinasi antara abu terbang, limbah kaca dengan berbagai *foaming agent* telah dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu, diantaranya; Wu *et al*, (2006) telah melakukan penelitian *foam glass-ceramic* dari campuran limbah silikat, yang dikombinasikan dengan 20% berat abu terbang batubara dan 80% berat limbah kaca botol. Menggunakan teknik pemanasan dengan penambahan 2% berat silikon karbida (SiC) sebagai *foaming agent*. Produk yang dihasilkan memiliki kerapatan antara 0,2-0,4 g/cm³, dan porositas berkisar antara 70 hingga 90%. Suhu pemanasan optimal terjadi pada 1.000-1.050°C, didapatkan porositas sekitar 75%. *Foam glass-ceramic* yang dihasilkan pada kondisi ini menunjukkan kuat tekan yang memuaskan sekitar 1,5 MPa, kekuatan tekan secara bertahap menurun seiring dengan peningkatan suhu pendinginan (Wu *et al*, 2006). Penelitian yang dilakukan oleh Tulyaganov *et al*, (2006) telah di produksi *foam glass-ceramic* untuk aplikasi struktural dan isolasi dalam konstruksi bangunan, menggunakan limbah lembaran kaca dan SiC sebagai *foaming agent*. Produk yang

dihasilkan memiliki kuat tekan 0,239-0,309 MPa, dengan pori berbentuk pentagonal dan heksagonal (Tulyaganov *et al*, 2006).

Dalam kasus *foam glass-ceramic* yang dibuat dari lumpur merah yang merupakan limbah pengolahan bauksit, dengan abu terbang, campuran terbaik diperoleh dengan komposisi 40-50% berat lumpur merah limbah pengolahan bauksit, 26,25-40% berat abu terbang, 15-20% berat natrium borat dan 5% berat natrium silikat, membentuk pori pada suhu 900°C dengan waktu tahan pemanasan selama 2 jam. Produk yang dihasilkan memiliki kuat tekan 4,04-10,63 MPa (Chen *et al*, 2012). *Foam glass-ceramic* dengan kandungan abu terbang tinggi (50-70% berat) berhasil dibuat pada suhu rendah (800°C) menggunakan abu terbang sebagai bahan baku utama, dengan masing-masing kalsium karbonat dan natrium borat sebagai *foaming agent* dan bahan fluks (Chen *et al*, 2012).

Marangoni *et al*, (2014) telah melakukan penelitian dengan menghasilkan *cellular glass-ceramic* dengan pemanasan campuran batuan basal jenis *scoria* dan *soda lime cullet* selama 15 menit pada suhu 1.050 dan 1.100°C. Pengaruh ion polivalen (Fe^{3+}/Fe^{2+}) pada porositas (dari 53 hingga 86%) dan kristalisasi dipelajari dengan campuran berbeda dan perlakuan termal yang berbeda. *Cellular glass-ceramic* yang dihasilkan memiliki kisaran nilai kuat tekan dari 2 hingga 50 MPa sehingga dapat digunakan sebagai bahan bangunan, sebagai agregat ringan untuk beton atau sebagai panel ringan. Pada penelitian ini, *foaming agent* tidak diperlukan, terjadi mekanisme *self-foaming* terkait dengan reaksi redoks yang terjadi antara besi oksida yang berbeda.

Ewais *et al*, (2018) melakukan penelitian penggunaan *nano aluminium nitride* (AIN) sebagai *foaming agent* pada pembuatan *foam glass-ceramic* menggunakan bahan baku limbah kaca. Suhu proses antara 850-950°C, digunakan 2,5-7,5% berat AIN sebagai *foaming agent*. Produk yang dihasilkan memiliki kerapatan kurang dari 0,5 g/cm³, kuat tekan berkisar antara 0,65-2,48 MPa dan konduktivitas termal antara 0,09-0,106 W/mK. Hasil yang diperoleh cukup menjanjikan, teknologi yang digunakan hemat biaya sehingga cocok untuk produksi skala besar *porous glass-ceramic*, dan memiliki sifat yang sesuai untuk digunakan pada berbagai aplikasi struktural (Ewais *et al*, 2018).

Penggunaan teknologi pemanasan menggunakan *microwave* telah dilakukan pada pembuatan *foam glass-ceramic* berbahan baku abu terbang, natrium karbonat, dengan penambahan air dan kalsium karbonat (Paunescu *et al*, 2020).

2.2 Limbah Pembakaran Batubara PLTU (Abu Terbang)

Peraturan Pemerintah Nomor 22 Tahun 2021, mengkategorikan abu terbang yang dihasilkan PLTU pada pembakaran batubara sebagai limbah non berbahaya dan beracun (non B3). Hal tersebut dikarenakan pembakaran batubara di PLTU dilakukan pada suhu tinggi, sehingga kandungan jumlah karbon yang tidak habis terbakar dalam abu terbang menjadi minimum dan lebih stabil. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (LHK) pada tahun 2020, telah melakukan uji terkait abu terbang PLTU, diantaranya, abu terbang PLTU tidak mudah menyala dan tidak mudah meledak, tidak ditemukan hasil reaktif terhadap sianida dan sulfida, serta tidak ditemukan korosif pada abu terbang PLTU. Hasil uji tersebut

menunjukkan bahwa limbah abu terbang PLTU tidak memenuhi karakteristik sebagai limbah B3. PP No 22 Tahun 2021, mengindikasikan bahwa pemerintah sedang berusaha untuk memanfaatkan batubara secara maksimal baik hulu maupun hilirnya.

Metode pembakaran batubara yang paling umum, terutama untuk produksi energi dalam skala besar, adalah pembakaran bahan bakar bubuk (*pulverized coal*), juga disebut sebagai pembakaran fase-terfokus atau pembakaran dengan suspensi. Pada proses ini batubara ditumbuk menjadi bubuk halus dan diinjeksikan dengan aliran udara ke ruang tungku, sehingga menyala membentuk bola api pada kisaran suhu antara 1.300-1.700°C. Sebagian besar abu yang dihasilkan dari proses ini bergerak sebagai partikel tersuspensi bersama dengan gas pembakaran, kemudian ditangkap oleh *electrostatic precipitators (ESPs)* atau peralatan filtrasi partikel lainnya seperti *bag house filter*, abu tersebut dikenal sebagai abu terbang, sedangkan abu dasar adalah abu yang bercampur dengan fragmen hasil pembakaran lainnya, terlepas dari endapan yang terbentuk pada dinding tungku pembakaran dan kemudian jatuh ke bagian bawah ruang pembakaran (Hower *et al*, 2017). Abu terbang tersusun oleh material yang bersifat heterogen yang umumnya berbentuk bulat dengan ukuran berkisar antara 0,5-300 μm sedangkan abu dasar memiliki ukuran yang lebih kasar $> 0,5 \mu\text{m}$ (Chiang dan Pan, 2017). Abu terbang tersusun oleh partikel-partikel serbuk halus yang sebagian besar berbentuk bola, baik padat atau berlubang, dan sebagian besar bersifat amorf. Secara umum, abu terbang memiliki kerapatan sekitar 2,0 g/cm^3 namun dapat bervariasi sebagian besar berkisar mulai dari 1,6 s.d. 3,1 g/cm^3 . Variasi ini disebabkan oleh kombinasi beberapa faktor seperti bentuk partikel, gradasi, dan komposisi kimia (Pandian,

2013). Berdasarkan distribusi ukuran butirnya, abu terbang tersusun oleh partikel berukuran butir pasir hingga lanau. Abu terbang memiliki luas permukaan yang tinggi dengan nilai kerapatan rendah (Ram *et al*, 2014). Jumlah karbon yang tidak habis terbakar dan senyawa besi yang tidak terbakar memengaruhi warna abu terbang yang dihasilkan, sehingga warna dapat bervariasi dari oranye hingga merah tua, coklat, atau putih hingga kuning (Ahmaruzzaman, 2010). Senyawa utama penyusun abu terbang batubara adalah SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , dengan jumlah karbon yang bervariasi (direpresentasikan sebagai *loss on ignition (LOI)*), CaO , dan MgO (Sahoo *et al*, 2016). Abu terbang dapat diklasifikasikan berdasarkan peringkat batubara, meliputi abu terbang bituminus, sub-bituminus, dan lignit (Meawad *et al*, 2010). Abu terbang dari pembakaran lignit dan batubara sub-bituminus dicirikan oleh konsentrasi kalsium dan magnesium oksida yang lebih tinggi dan berkurangnya persentase silika dan besi oksida, serta kandungan karbon yang lebih rendah, dibandingkan dengan abu terbang batubara bituminus.

Menurut ASTM C.618, (2003), terdapat dua jenis abu terbang, kelas F dan kelas C. Untuk kelas F dihasilkan dari pembakaran batubara jenis antrasit atau bituminous, sedangkan kelas C dari batubara jenis lignite atau subituminous. Sedangkan dalam SNI S-15-1990-F, (1990), spesifikasi abu terbang sebagai bahan tambahan untuk campuran beton disebutkan ada 3 jenis abu terbang. Jenis pertama yaitu abu terbang kelas F, ialah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran batubara jenis antrasit pada suhu 1.560°C . Jenis kedua, abu terbang kelas N, ialah abu terbang yang dihasilkan dari kalsinasi pozzolan alam, misalnya tanah diatom, *shale*, *tuft*, dan batu apung. Jenis ketiga, abu terbang kelas C, adalah abu terbang yang dihasilkan dari pembakaran lignit atau batubara dengan kadar

karbon sekitar 60%, abu terbang ini mempunyai sifat seperti semen dengan kadar kapur di atas 10%.

2.3 Batuan Basal

Batu basal adalah batuan yang termasuk jenis batuan beku ekstrusif, merupakan beku vulkanik yang berasal dari hasil pembekuan magma yang terjadi di permukaan bumi seperti yang terlihat pada Gambar 2.1

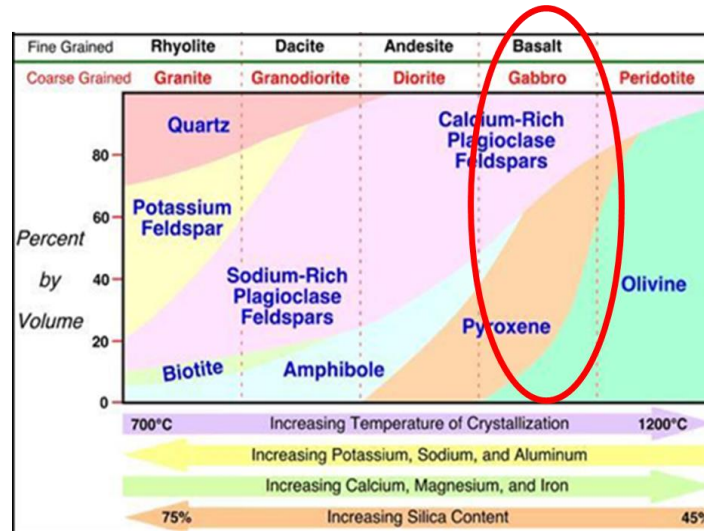


Gambar 2.1. Kenampakan singkapan batuan basal (Adiyatma *et al*, 2019).

Sedangkan definisi batu basal menurut ahli adalah batuan beku aphanitic yang mempunyai kandungan kuarsa tidak lebih dari 20%, kadar feldspathoid kurang dari 10% dan persentase mineral felspar dalam bentuk plagioklas sebesar 65%. Komposisi batu basal terdiri atas mineral piroksin, amfibol, plagioklas dan gelas vulkanik.

Keberadaan gelas vulkanik hanya dimiliki oleh batu basal, kandungan mineral vulkanik ini hanya dapat terlihat pada jenis batuan basal yang berukuran butir

kuarsa, yaitu jenis dari batuan basal yang bernama gabbro, seperti terlihat pada Gambar 2.2 (Le Bas dan Streckeisen, 1991).



Gambar 2.2. Grafik klasifikasi batuan beku (Le Bas and Streckeisen, 1991).

Gabbro adalah batuan yang terdiri dari mineral-mineral berupa olivine dan piroksin. Sedangkan feldspar terdiri dari feldspar plagioklas-Ca. Teksturnya kasar, karena mempunyai waktu pendinginan yang cukup lama di dalam litosfir. Kalau lava membeku lebih cepat karena mencapai permukaan bumi, maka batuan beku yang terjadi adalah basal dengan tekstur halus. Jadi gabbro dan basal keduanya mempunyai susunan mineral yang sama, tetapi teksturnya berbeda (Emeleus dan Troll, 2014).

Berdasarkan komposisi kimianya, basal dapat dibedakan menjadi dua tipe, yaitu basal alkali dan basal tholeitik. Perbedaan di antara kedua tipe basal itu dapat dilihat dari kandungan Na_2O dan K_2O (Le Bas dan Streckeisen, 1991). Batu basal alkali memiliki kandungan Na_2O dan K_2O lebih tinggi dengan $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ antara 2 hingga 4, sedangkan basal tholeitik antara 4 hingga 8. Basal alkali lebih sering dijumpai di daerah kerak benua yang terangkat berbentuk kubah (*updomed*

continental crust) dan kerak benua yang memiliki *rifting* (*rifted continental crust*) dan berada di pulau-pulau oseanik seperti pulau Hawaii. Sementara basal tholeitik banyak terdapat di permukaan samudra yang berbentuk sangat besar sehingga membentuk plateau di kerak bumi. Plateau merupakan bentuk permukaan bumi yang berbentuk dataran tinggi dengan bagian atas biasanya rata karena mengalami erosi. Di Indonesia plateau basal terdapat di kecamatan Sukadana, Lampung Timur (Zulkarnain, 2011).

Di dalam penelitian Birawidha *et al*, (2019) tentang karakterisasi batuan basal, melalui proses peleburan dan modifikasi perlakuan pendinginannya, hasil peleburan batuan basal mempunyai sifat karakterisasi yang berbeda, apabila didinginkan secara lambat dia membentuk kembali kristalisasi awalnya dengan sifat mekanis yang lebih keras, dan jika dia didinginkan cepat, strukturnya cenderung amorf dan getas. Teknologi pembuatan keramik berbasis batuan basal masih jarang dilakukan. Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, negara Eropa Timur dan Tiongkok yang mulai mengembangkan proses pembuatan keramik berbasis batuan basal (Birawidha *et al*, 2019). Prinsip dasar teknologinya adalah proses pemanasan, dimana batuan basal dipanaskan pada suhu di bawah titik leleh batuan tersebut. Proses pembuatan keramik dilakukan dengan penambahan 3-10% bahan aditif seperti *paraffin*, dengan tekanan sebesar 300-1.800 kgf/cm². Dilanjutkan dengan proses kalsinasi pada suhu proses 800-900°C, dan secara perlahan-lahan suhu dinaikan sampai 1.000-1.100°C. Proses pemanasan secara keseluruhan berlangsung selama 24 jam (Fomichev *et al*, 2011; Bayrak dan Yilmaz, 2014).

2.4 Limbah Pengecoran Aluminium (*Aluminium Dross*)

Aluminium merupakan unsur paling melimpah ke tiga setelah oksigen dan silikon di bumi yang tidak ditemukan sebagai unsur bebas di alam. Aluminium adalah logam yang ringan, konduktif, tahan korosi, mudah dibentuk, non-magnetik, tahan air dan dapat dipadukan dengan logam lainnya. Dengan karakteristik tersebut, aluminium banyak digunakan pada industri kedirgantaraan, konstruksi bangunan, otomotif, pertahanan, kelautan dan industri lainnya. Aluminium di produksi melalui dua rute yang berbeda, yaitu aluminium primer yang diperoleh dari sumber daya alam berupa bijih bauksit dan aluminium sekunder (daur ulang) yang di peroleh dari sisa proses dan produk aluminium bekas (*scrap*). Produksi aluminium primer membutuhkan energi yang besar, dan menghasilkan emisi gas CO₂ dalam jumlah banyak. Daur ulang aluminium dapat menggunakan bahan baku berupa *scrap* aluminium seperti kaleng minuman bekas, foil, limbah pembubutan, dan logam paduan aluminium.

Dalam proses peleburan aluminium dihasilkan limbah berupa aluminium *dross*. Aluminium *dross* diklasifikasikan menjadi dua jenis, yaitu *black dross* dan *white dross*. *Black dross* (kering) memiliki kandungan logam yang rendah namun jumlah oksida dan garam yang tinggi, serta berbentuk seperti butiran yang mirip dengan pasir. Sedangkan *white dross* (basah) memiliki kandungan logam yang sangat tinggi dengan sejumlah kecil oksida serta garam dan membentuk gumpalan besar atau blok. Aluminium *dross* biasanya diperoleh dari peleburan *scrap* aluminium seperti wadah minuman bekas dan pelapis aluminium (Adeosun, 2014). *Dross* terbentuk ketika aluminium cair bersentuhan dengan udara pada

permukaan luar cairan tersebut (Sarker *et al*, 2015). Pada dasarnya aluminium *dross* mengandung alumina (Al_2O_3), spinel (MgOAl_2O_3), residu garam (NaCl , KCl , CaF_2), nitrida (AlN), dan sejumlah kecil fluorida, klorida, dan komponen lainnya (misalnya, MgF_2 , NaAlCl_4 , KAlCl_4 , MgO , KMgF_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , $\text{Al}_4\text{CN}_2\text{O}$, K_2NaAlF_6) (Mostafa dan Ali, 2018; Theam *et al*, 2018).

Aluminium *dross* telah dimanfaatkan dalam pembuatan bahan tahan api dengan bentuk seperti batu bata. Aluminium *dross* digunakan sebagai sumber alumina pada proses pembakaran klinker pada pembuatan semen kalsium aluminat yang memiliki karakteristik semen tahan api (Tsakiridis, 2012). Dalam larutan basa, aluminium mampu menghasilkan hidrogen (Elsarrag *et al*, 2017). Komponen oksida dan nitrida yang terkandung pada aluminium *dross*, dapat berfungsi sebagai *valorized* dalam pembuatan keramik, gelas, dan *glass ceramic* (Theam *et al*, 2018; El-Amir *et al*, 2021). Sampai saat ini, hanya sedikit peneliti yang mempelajari efek pembusaan dengan memperkenalkan aluminium *dross* sebagai bahan *foaming agent* (Zhang *et al.*, 2020) Seperti pemaparan sebelumnya, aluminium *dross* telah digunakan dalam beberapa kasus untuk menghasilkan bahan alumina, klinker, semen atau *glass-ceramic* tetapi hanya beberapa penelitian yang menggunakan aluminium *dross* sebagai *foaming agent* (Shi *et al*, 2016) atau sebagai komponen dasar *foaming agent* (El-Amir *et al*, 2021).

2.5 Limbah Kaca

Kaca adalah suatu bahan transparan yang dibentuk dengan cara melebur campuran bahan-bahan seperti silika, natrium karbonat (Na_2CO_3), dan kalsium karbonat

(CaCO_3) pada suhu tinggi diikuti dengan proses pendinginan, dan pemadatan tanpa terjadi kristalisasi. Kaca diproduksi dalam berbagai bentuk, termasuk kaca kemasan atau wadah, kaca datar, kaca bohlam dan kaca tabung sinar katoda. Ada dua jenis limbah kaca; berwarna dan tidak berwarna. Limbah kaca tidak berwarna lebih efektif untuk dilakukan proses daur ulang. Sementara limbah kaca berwarna memiliki tingkat daur ulang yang rendah, dan umumnya dibuang ke tempat pembuangan akhir sampah. Berkurangnya tempat pembuangan akhir sampah menyebabkan penimbunan limbah kaca akan menjadi semakin sulit. Karena kaca tidak dapat terurai secara hayati, tempat pembuangan akhir sampah tidak memberikan solusi yang ramah lingkungan. Oleh karena itu, ada keinginan yang kuat untuk memanfaatkan limbah kaca menjadi produk yang memiliki nilai tambah. Partikel pecahan kaca atau yang disebut *cullet*, umumnya berbentuk sudut dan mungkin mengandung beberapa partikel memanjang dan datar. Kaca yang tidak terkontaminasi atau bersih menunjukkan sifat yang konsisten karena tidak tercampur dengan material lainnya. Namun, sifat limbah kaca yang diperoleh dari Instalasi Pengolahan Sampah Terpadu (IPST) lebih banyak bervariasi karena adanya puing-puing non-kaca yang ada di dalam limbah kaca tersebut (Siddique, 2008).

Material pembentuk kaca adalah elemen yang dapat diubah menjadi kaca ketika digabungkan dengan oksigen. Silikon dioksida (SiO_2), digunakan dalam bentuk pasir, adalah bahan baku pembentuk kaca yang paling umum. Gelas biasa mengandung sekitar 70% SiO_2 . Natrium karbonat (Na_2CO_3) bertindak sebagai agen fluks dalam lelehan. Fluks digunakan untuk menurunkan titik leleh dan viskositas kaca yang terbentuk, melepaskan karbon dioksida, dan membantu

dalam proses pengadukan lelehan. Botol kaca dan kaca jendela umumnya terbuat dari kaca soda-lime. Sementara gelas alkali-silikat timbal digunakan dalam pembuatan bola lampu, lampu neon, gelas kristal dan optik. Gelas borosilikat, yang memiliki ketahanan kimia yang luar biasa dapat digunakan dalam pembuatan peralatan rumah tangga (alat-alat memasak) dan peralatan laboratorium (Samtur, 1974).

Selama beberapa dekade terakhir, seiring dengan timbulnya kesadaran terhadap lingkungan, ada upaya untuk melakukan proses daur ulang limbah kaca. Daur ulang limbah kaca telah dilakukan dengan cara pengumpulan limbah kaca di IPST. Dalam unit IPST terdapat fasilitas yang dirancang untuk memilah, menyimpan, dan memasarkan hasil daur ulang sampah kota yang dikumpulkan di tepi jalan. Pada sebagian besar IPST, limbah kaca dipisahkan berdasarkan warna (putih, kuning, dan hijau), dan dihancurkan untuk pengecilan ukuran (umumnya berukuran kurang dari 50 mm). Limbah kaca yang dihancurkan (*cullet*) sebagian besar dipasarkan sebagai bahan baku dalam pembuatan wadah kaca baru. Pada pembuatan kaca botol dan stoples, limbah kaca dapat digunakan hingga mencapai 80% dari total campuran bahan baku yang digunakan. Jika kaca daur ulang digunakan dalam pembuatan botol dan stoples baru, energi yang dibutuhkan dalam proses pembakaran di tungku sangat berkurang. Daur ulang limbah kaca dapat mengurangi permintaan bahan mentah, dan mengurangi jumlah sampah kaca yang ditimbun pada tempat pembuangan akhir sampah (Siddique, 2008).

Terdapat beberapa jenis limbah kaca, diantaranya limbah kaca elektronik dan limbah kaca kontainer. Bola lampu neon dan tabung sinar katoda (*Cathode Ray Tubes*) atau CRT termasuk dalam jenis limbah kaca elektronik. Bola lampu neon

didefinisikan sebagai cahaya lampu yang dihasilkan dari pelepasan gas yang menggunakan listrik untuk membangkitkan uap merkuri. Atom merkuri yang tereksitasi menghasilkan sinar ultraviolet gelombang pendek yang menyebabkan fosfor untuk berpendar, menghasilkan cahaya tampak. Merkuri merupakan komponen penting dari semua bola lampu neon, dan memungkinkan bola lampu ini menjadi sumber cahaya hemat energi. Karena merkuri adalah bahan berbahaya, bola lampu neon dianggap menjadi limbah berbahaya. Bola lampu neon mengandung sekitar 10 hingga 100 mg merkuri tergantung pada kapasitas dayanya. Sedangkan bola lampu neon kompak per lampu mengandung dari 5 sampai 10 mg merkuri. Sejak tahun 2004 terjadi peningkatan produksi dan penggunaan alat-alat elektronik yang menggunakan bola lampu *fluorescent* untuk penerangan di tampilan layar. Layar kristal cair (*Liquid Crystal Display*) atau LCD memiliki lampu latar yang berisi lampu neon. Layar ini tercerahkan ketika merkuri diberi energi listrik. Yang termasuk didalamnya layar LCD adalah: komputer, televisi layar datar, kamera digital, perangkat unit GPS, ponsel dan alat komunikasi lainnya. CRT adalah komponen tampilan televisi dan monitor komputer. Beberapa jenis CRT mengandung 25% oksida timbal yang ditambahkan untuk melindungi pengguna dari sinar X yang dihasilkan selama proses operasi berlangsung. Karena timbal adalah bahan berbahaya, CRT tidak boleh dibuang di tempat sampah, CRT harus dibuang di tempat pembuangan akhir untuk limbah berbahaya. Mendaur ulang CRT adalah pilihan terbaik dalam mengelola limbah CRT (Abdel, 2009).

Gelas kontainer adalah gelas yang digunakan untuk membuat toples dan botol seperti botol minuman ringan, botol minuman keras, botol mayones, toples

makanan bayi, dan banyak lagi kemasan makanan dan minuman lainnya. Kaca kontainer adalah satu-satunya jenis kaca yang didaur ulang dalam jumlah besar pada saat ini. Jenis kaca lainnya seperti panel jendela, bola lampu, cermin, barang pecah belah, kristal, peralatan oven, tabung sinar katoda dan *fiberglass* belum banyak didaur ulang, barang-barang tersebut masih dianggap kontaminan dalam siklus daur ulang kaca kontainer. Pewarna permanen digunakan untuk memberikan warna yang berbeda untuk kaca kontainer. Warna yang paling umum adalah hijau, coklat dan putih (tanpa warna). Dalam industri, kaca hijau disebut zamrud, kaca coklat disebut amber dan kaca tidak berwarna disebut *flint*. Agar botol dan toples daur ulang sesuai spesifikasi tertentu, hanya *cullet* amber atau zamrud (kaca pecah) yang dapat digunakan untuk membuat botol coklat dan hijau. Kaca kontainer terbuat dari pasir silika, natrium karbonat dan batu kapur. Terak, feldspar, aragonit, dan *cullet* adalah bahan lainnya yang digunakan dalam proses pembuatan kaca kontainer. Campuran tersebut dipanaskan sampai dengan suhu 1.675°C. Kaca yang meleleh kemudian dibentuk oleh mesin pembentuk, ditekan ke dalam bentuk yang diinginkan atau dihembuskan udara sehingga menjadi bentuk yang diinginkan. Proses pendinginan kaca kontainer dilakukan secara perlahan-lahan di dalam tungku anil (Abdel, 2009).

2.6 Foam Glass-Ceramic

Foam glass adalah bahan anorganik untuk insulasi termal yang pertama kali diperkenalkan di tahun 1920-an. Saat ini, produksi *foam glass* untuk keperluan insulasi termal dibuat menggunakan metode pemanasan serbuk karena konsumsi energi yang lebih rendah dan kapasitas produksi lebih besar dibandingkan dengan metode preparasi kaca berpori lainnya, seperti pembusaan lelehan langsung,

proses sol-gel, pembusaan fisik bertekanan tinggi atau proses pelindian. Dalam proses pemanasan serbuk, bubuk kaca digiling halus kemudian dicampur dengan *foaming agent* dan dipanaskan dalam tungku pembakaran (Scarinci *et al*, 2005).

Beberapa peneliti mendeskripsikan *foam glass-ceramic* sebagai material berpori yang terbentuk sebelum menjalani proses pemanasan dengan mencampurkan zat karbon dengan kaca, atau beberapa material yang umumnya memiliki porositas lebih dari 60% dari total volume, baik terbuka atau tertutup maupun keduanya (Souza *et al*, 2017). *Foam glass-ceramic* adalah bahan berpori yang secara fisik merupakan sistem heterofase yang terdiri dari fase gas dan fase padat. Fase padat terdiri dari kaca yang membungkus sel tunggal. Sel-sel ini diisi dengan fase gas (Samsal *et al*, 2015)/

Foam glass-ceramic menunjukkan kinerja mekanis yang luar biasa dan telah menarik minat yang cukup besar dari industri konstruksi karena keunggulan-keunggulan yang dimiliki oleh *foam glass-ceramic*, seperti ringan, dan kekuatan tekan yang tinggi, serta *inert* secara kimia dan tidak beracun (Da Silva *et al*, 2019). *Foam glass-ceramic* semakin banyak digunakan dalam pembuatan material insulasi termal dan akustik, penyangga katalis, dan bidang lainnya. Pemanfaatan berbagai limbah padat sebagai bahan baku pembuatan *foam glass-ceramic* diantaranya abu insinerator limbah padat perkotaan (Liu B *et al*, 2019), terak metalurgi (Liu T *et al*, 2019), limbah kaca (Mi *et al*, 2017), dan sejenisnya.

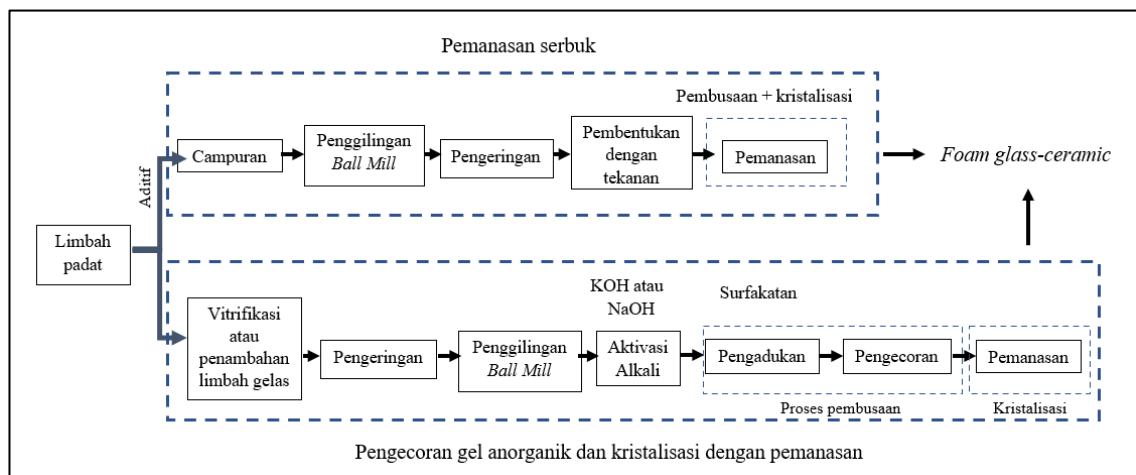
Proses pemanasan serbuk adalah rute yang paling umum untuk mensintesis *foam glass-ceramic*, menggunakan limbah padat sebagai bahan baku (Uribe *et al*, 2020). Biasanya bahan baku, *foaming agent*, fluks, dan lain-lain, dicampur secara

seragam dan ditekan agar terbentuk *foam glass-ceramic*. Selama perlakuan termal, campuran mencapai suhu pelunakan, membentuk cairan fase yang dapat melingkupi gas (Lee *et al*, 2016). Sementara itu, *foaming agent* yang terdispersi dalam campuran menghasilkan fase gas dan membentuk inti gelembung. Dengan perpanjangan waktu pemanasan, viskositas zona leleh menurun, dan inti gelembung secara bertahap tumbuh. Ketika pemanasan selesai dan suhu berkurang, viskositas zona lebur meningkat tajam, dan gelembung-gelembung itu membeku di badan kaca untuk membentuk pori-pori. Terjadi reaksi in-situ *foaming agent* pada suhu tinggi, sehingga dapat dilihat bahwa pemilihan *foaming agent* sangat penting untuk pembentukan pori-pori. Di satu sisi, suhu gas yang dihasilkan oleh *foaming agent* harus berada dalam kisaran pelunakan bahan atau sedikit lebih tinggi, di sisi lain, biaya *foaming agent* harus murah, residu yang terbentuk tidak berbahaya, dan dapat terintegrasi dengan komponen utama dalam lelehan. *Foaming agent* yang umum digunakan adalah karbonat, sulfat, karbon hitam dan silikon karbida, dan lain-lain. (Chen *et al*, 2019; Sun *et al*, 2018; Wang *et al*, 2018). Jumlah *foaming agent* yang ditambahkan memiliki pengaruh besar pada keseragaman pembentukan pori dan sifat mekanik dari *foam glass-ceramic*. Ewais *et al*, (2018) mempelajari sifat fisik dari *foam glass-ceramic* yang dibuat dengan menggunakan bubuk nano-AlN 2,5-7,5% berat sebagai *foaming agent* dengan bahan baku menggunakan limbah gelas soda-kapur. Didapatkan bahwa sampel dengan serbuk nano-AlN 2,5% berat mencapai kuat tekan maksimum 2,48 MPa dan konduktivitas termal sebesar 0,103 W/mK setelah ditahan pada suhu 900°C selama 30 menit (Ewais *et al*, 2018). Selain itu, beberapa peneliti juga memilih limbah yang dapat menghasilkan gas pada suhu tinggi sebagai *foaming*

agent, seperti cangkang telur, tailing dan sebagainya (Liu T *et al*, 2018; Saparuddin *et al*, 2020; Souza *et al*, 2017).

Liu T. *et al*, (2019) melaporkan bahwa *foam glass-ceramic* dengan kalsit sebagai fase kristal utama disiapkan dengan pemanasan lumpur merah limbah pengolahan bauksit dan limbah isolator listrik pada 1.140°C selama 1 jam. Ketika jumlah limbah isolator listrik sebanyak 80% berat, didapatkan sampel dengan nilai kerapatan massal $0,66 \text{ g/cm}^3$, porositas mencapai 73,6%, kuat tekan sebesar 11,3 MPa, dan porositas masih dapat mencapai $69,8 \pm 1,5\%$ dan $61,3 \pm 1,1\%$ setelah pemanasan kedua dan ketiga (Liu T *et al*, 2019).

Dua cara utama pembuatan *foam glass-ceramic* dengan limbah padat sebagai bahan baku ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Alur pembuatan *foam glass-ceramic* (Zhang *et al*, 2020).

Kemampuan kaca meleleh menjadi busa melalui metode pemanasan dipengaruhi oleh banyak faktor, seperti komposisi kaca, ukuran partikel, suhu proses, waktu penahanan, jenis dan komposisi *foaming agent*. Suhu pemanasan, laju pemanasan

dan waktu penahanan relatif mudah untuk mengontrol parameter, sehingga parameter ini yang paling banyak dipelajari.

Aplikasi *foam glass-ceramic* dapat digunakan untuk berbagai aplikasi, diantaranya:

a. Bahan isolasi termal

Morfologi pori pada *foam glass-ceramic* dapat diklasifikasikan menjadi jenis sel terbuka dan sel tertutup, dan aplikasi dari *foam glass-ceramic* pada dasarnya tergantung pada proporsi terbuka dan tertutupnya porositas (König *et al*, 2020). Menurut prinsip perpindahan panas, ketika struktur pori dalam bahan berpori ada dalam bentuk mikro, sel bulat dan tertutup, struktur ini yang efektif untuk mencapai isolasi termal dan kekuatan yang tinggi (Silva *et al*, 2017). *Foam glass-ceramic* dengan porositas tertutup lebih cocok untuk bahan isolasi termal (Pabst dan Gregorova, 2014). Konduktivitas termal merupakan faktor penting dalam mengevaluasi apakah suatu produk dapat digunakan untuk bahan isolasi termal. Umumnya, jika suatu produk memenuhi standar bahan isolasi termal, nilai konduktivitas termalnya tidak boleh melebihi 0,25 W/mK (Owoeye *et al*, 2020). Petersen *et al*, (2015) dalam penelitiannya menyiapkan *foam glass-ceramic* untuk insulasi panas dengan menggunakan tabung sinar katoda. Mereka menunjukkan konduktivitas termal berhubungan linier dengan kerapatan massal, sedangkan ukuran pori dan kristal memiliki pengaruh kecil pada konduktivitas termal keseluruhan. Namun, kerapatan massal *foam glass-ceramic* terkait erat dengan porositas, dan ukuran pori secara tidak langsung

memengaruhi porositas. Hasilnya menunjukkan bahwa konduktivitas termal menurun dengan meningkatnya porositas (Petersen *et al*, 2015).

b. Bahan isolasi akustik

Bahan isolasi akustik sangat diperlukan untuk meningkatkan kenyamanan penghuni dalam suatu ruangan dan mengatasi tingkat polusi suara yang semakin meningkat (Kempen *et al*, 2018). Diyakini bahwa bahan isolasi akustik alternatif (*stone wool/ glass wool*) yang digunakan dalam konstruksi dan restorasi memiliki kinerja linier terhadap frekuensi tetapi bahan ini hanya dapat menunjukkan penyerapan suara yang optimal per kinerja pada 1.000 Hz (Pedroso *et al*, 2017). Ketika gelombang suara memasuki bahan dengan porositas tinggi, itu akan menyebar di sepanjang pori-pori yang terhubung dan terus menerus melemahkan. Beberapa peneliti telah menunjukkan bahwa rentang respons terbaik bahan isolasi akustik terhadap suara adalah 1.250 sampai 3.150 Hz (Doutres *et al*, 2010).

Foam glass dengan struktur terbuka dikembangkan untuk penyerapan akustik menggunakan metode sol-gel dan pengeringan beku. Hasil sifat akustik menunjukkan bahwa sampel memiliki penyerapan suara yang sangat baik dalam rentang frekuensi menengah (2.000–2.600 Hz) (Kyaw Oo D'Amore *et al*, 2017). Hasil serupa juga dilaporkan oleh Moraes *et al*, (2019), dalam penelitiannya cangkang keramik dengan proporsi yang berbeda (10–70% vol) dari *styrofoam* yang digunakan sebagai bahan baku untuk membuat *foam ceramic* dengan porositas hingga 77%. Menurut pengukuran, kehilangan transmisi dan efisiensi penyerapan suara, *foam ceramic* memiliki koefisien penyerapan suara $\sim 0,9$ dalam rentang frekuensi 3.000 Hz, dan di area

frekuensi tinggi, kehilangan transmisi maksimum adalah antara ~ 5-10 dB. Kinerja yang dihasilkan lebih baik daripada *stone wool* dan *glass wool* untuk penggunaan komersial, hal ini menunjukkan bahwa produk tersebut menjanjikan sebagai bahan peredam suara dalam pengendalian kebisingan (Moraes *et al*, 2019).

c. Penyangga katalis

Dibandingkan dengan isolator termal dan akustik, penerapan *foam glass-ceramic* di bidang katalis dapat meningkatkan nilai tambah produk. Karena luas permukaan spesifik yang tinggi, sangat baik untuk perpindahan panas dan massa, *foam glass-ceramic* memiliki kapasitas dan aktivitas adsorpsi yang baik setelah memuat katalis, efisiensi, konversi dan laju reaksi akan sangat meningkat dibandingkan dengan reaktor unggun tetap konvensional (Guo *et al*, 2021). *Foam glass-ceramic* sebagai penyangga katalis terutama di bidang katalis knalpot mobil dan fotokatalis. Dalam aplikasi otomotif, pengaruh *foam glass* pada aliran gas buang, penurunan tekanan, dan keseragaman aliran perlu dipertimbangkan. *Foam glass-ceramic* dengan bentuk sarang lebah, memiliki penurunan tekanan yang lebih tinggi dan meningkatkan keseragaman aliran, terutama disebabkan oleh struktur yang homogen di dalam substrat *foam ceramic*, membuat pertukaran momentum tegak lurus terhadap arah aliran utama (Eggenschwiler *et al*, 2009). Fotokatalis adalah sejenis teknologi perlindungan lingkungan yang dapat mendegradasi polutan secara efisien. Ada banyak penyangga fotokatalis seperti busa logam, bahan karbon berpori, dll. (Qin *et al*, 2020; Zhang *et al*, 2019). Limbah industri kaca dan aluminium nitrida dirubah menjadi *foam glass-ceramic* dengan porositas lebih dari 70%,

yang dapat digunakan sebagai penyangga fotokatalis. Sampel dengan lapisan TiO₂, memiliki kinerja foto degradasi mirip dengan fotokatalis komersial. (Lebullenger *et al*, 2010). Sebuah fotokatalis dapat digunakan untuk menghilangkan mikroorganisme dari air laut (Lee *et al*, 2011).

d. Penyerapan gelombang mikro

Pemakaian peralatan elektronik dan komunikasi di masyarakat, menyebabkan orang yang menggunakannya terpapar polusi gelombang elektromagnetik (Chen *et al*, 2011). Struktur berpori memiliki pengaruh penting pada permitivitas relatif bahan, yang dapat berperan dalam meningkatkan kinerja penyerapan gelombang elektromagnetik (Song *et al*, 2017). Oleh karena itu, struktur berpori sering dirancang sebagai penyerap gelombang elektromagnetik (Ding *et al*, 2017; Liu *et al*, 2017). Dalam beberapa tahun terakhir, beberapa peneliti telah menyatakan bahwa *foam glass-ceramic* memiliki potensi untuk digunakan dalam bidang penyerapan elektromagnetik. *Foam glass-ceramic* tidak memiliki penyerapan gelombang elektromagnetik yang kuat, dan seringkali perlu didukung dengan bahan-bahan seperti: serat karbon (Benhaoua *et al*, 2015) atau grafit (Li *et al*, 2012) untuk meningkatkan sifat dielektrik sampel dan membentuk komposit bahan. Komposit *foam glass* berhasil dibuat dengan biaya yang murah dan memiliki refleksi rendah 29,62 dB (11,90 GHz) dengan *bandwidth* penyerapan besar (3,62 GHz), menggunakan kaca limbah dan butiran karet ban sebagai bahan baku (Lamri *et al*, 2020).

e. Aplikasi lain dari *foam glass-ceramic*

Foam glass-ceramic dapat digunakan sebagai media filter yang efisien untuk memindahkan partikel fosfor dari air limbah kota karena tingginya permeabilitas cairan. *Foam glass-ceramic* filter dengan porositas 60,2% dan kerapatan massal 0,50 g/cm³ telah dibuat dalam skala laboratorium. Setelah membandingkan morfologi permukaan, komposisi unsur, porositas, berat jenis, ditemukan bahwa *foam glass* dengan porositas tinggi meningkatkan kemampuan permukaan area untuk menangkap partikel, menghasilkan durasi filtrasi yang lebih lama (lebih dari 2 kali) dan efisiensi penghilangan polutan yang sedikit lebih tinggi daripada pasir konvensional (Jeong *et al*, 2019). Beberapa peneliti juga telah berhasil menggunakan *foam ceramic* sebagai membran untuk proses filtrasi dan desalinasi air laut (Achiou *et al*, 2017). Membran keramik dengan porositas 32,12% dan diameter rata-rata pori 1,70 µm telah berhasil dibuat menggunakan bentonit alami. Ditemukan bahwa 94-99% partikel tersuspensi dalam air limbah dapat tertahan dalam pengujian menggunakan industri limbah sebagai media (Bouazizi *et al*, 2016).

Mirip dengan yang digunakan sebagai penyangga katalis, *foam glass-ceramic* dapat digunakan pada berbagai bidang setelah dibuat menjadi mikrosfer dengan media yang berbeda. Bahan penyimpanan energi termal adalah bidang penting lainnya yang menggunakan *foam ceramic*, terutama digunakan dalam bidang konstruksi, sistem perlindungan termal, sistem pendinginan udara, dan sistem pemanas surya. Bahan baku untuk pembuatan *foam ceramic* ini dapat berupa hidroksiapatit, SiO₂, TiO₂ dan seterusnya (Deng *et al*, 2017; Qian *et al*, 2015; Wang *et al*, 2017). *Foam ceramic* dengan porositas 70–90% dan kuat

tekan 0,4–6 MPa dengan metode *foam-gel casting* berhasil dibuat menggunakan limbah industri tailing besi, lilin parafin cair disuntikkan ke dalam *foam ceramic*. Akhirnya, diperoleh bahan komposit dengan kepadatan penyimpanan energi termal 71 hingga 123 kJ/kg (Li *et al*, 2019).

2.7 Karakterisasi Sampel

2.7.1 X-ray Fluorescence

X-ray Fluorescence (XRF) merupakan suatu metode yang mampu menganalisa suatu unsur dalam bentuk padatan, bubuk ataupun sampel cair. Teknik ini dapat digunakan untuk mengukur unsur-unsur utama yang terdapat dalam batuan atau mineral. Dalam penelitian ini, XRF dilakukan untuk menganalisis komposisi kimia yang terkandung dalam bahan baku yang digunakan dan *foam glass-ceramic* yang dihasilkan.

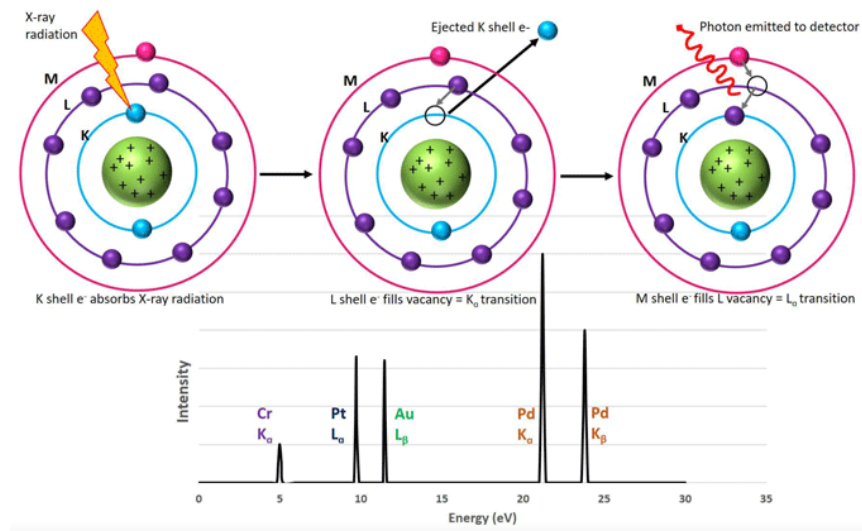
Spektrometer XRF adalah alat uji yang digunakan untuk analisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-X karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum. Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-X karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X). Bila energi sinar tersebut lebih tinggi

daripada energi ikat elektron dalam orbit K, L atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-X. Sinar-X yang dihasilkan merupakan suatu gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum *discreet* yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X karakteristik.

XRF memiliki banyak keuntungan untuk laboratorium analitik yang mencakup preparasi sampel sederhana yang tidak menghasilkan limbah kimia, serta biaya pemeliharaan yang relatif rendah. XRF tidak merusak sehingga sampel dapat dianalisis melalui XRF dan kemudian dianalisis dengan metode lain jika diinginkan. XRF mampu menganalisis sampel padat, serbuk, pelet maupun sampel cair (Oyedotun, 2018).

Pada proses analisis menggunakan XRF, sampel diradiasi dengan sinar-X, sinar-X tersebut diserap oleh elektron di dalam orbital atom. Penyerapan energi sinar-X ini menyebabkan elektron-elektron di dalam orbital keluar dari atom meninggalkan kekosongan di dalam kulit elektron. Elektron kemudian mengisi kekosongan ini dari tingkat energi yang lebih tinggi, yang menyebabkan pelepasan energi dalam bentuk foton. Foton yang dapat dideteksi ini memiliki energi yang sama dengan perbedaan energi antara orbital awal dan elektron akhir, membuat nilai energi berbeda untuk

elemen tertentu. Kekosongan diisi oleh elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi, lagi-lagi melepaskan sinar-X fluoresen, dan seterusnya, seperti digambarkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Proses terjadinya sinar-X (Puglia, 2021).

Gambar 2.4, menggambarkan tingkat energi elektron K, L, dan M suatu atom. Kiri ke kanan: Radiasi sinar-x awal dari elektron K dalam yang menyebabkan ejsksi dan kekosongan pada tingkat energi dalam. Elektron L turun untuk mengisi kekosongan ini dan melepaskan foton dari energi tertentu (dikenal sebagai transisi K α). Kekosongan L kemudian diisi oleh elektron M (transisi L α) dan foton lain dilepaskan ke detektor dengan energi yang berbeda dari yang pertama. Kedua energi foton khusus untuk elemen yang terionisasi dan pendeteksiannya mengarah ke plot yang mirip dengan panel bawah. Saat penggantian kekosongan elektron selesai, sampel memancarkan sejumlah foton fluoresen karakteristik berbeda yang dideteksi oleh mesin XRF. Ini dicapai dengan mengukur energi atau panjang gelombang foton. Teknik terakhir memberikan pengukuran dengan resolusi lebih tinggi dan lebih disukai untuk analisis kuantitatif.

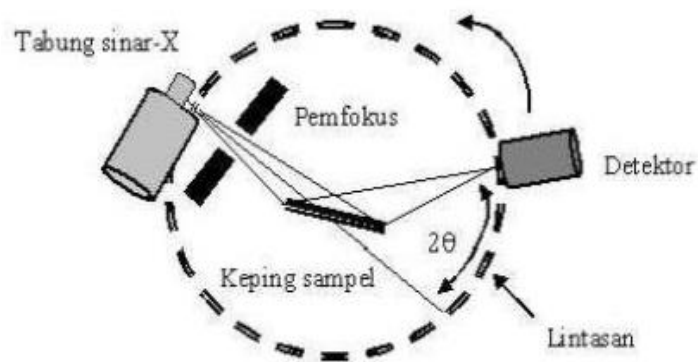
XRF kemudian mampu menghasilkan spektrum intensitas total foton yang dikumpulkan pada setiap panjang gelombang spesifik yang unik untuk setiap elemen. Elemen yang ada dalam sampel diidentifikasi oleh posisi puncak dan dihitung dengan membandingkan intensitas puncak dengan standar yang diketahui.

2.7.2 *X-Ray Diffraction (Difraksi sinar -X) atau XRD*

Difraksi sinar-X merupakan metode analisis yang memanfaatkan interaksi antara sinar-X dengan atom yang tersusun dalam sebuah sistem kristal. Analisis XRD merupakan contoh analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan mengamati pola pembiasan cahaya sebagai akibat dari berkas cahaya yang dibiaskan oleh material yang memiliki susunan atom pada kisi kristalnya.

XRD merupakan metode analisa yang mampu mengidentifikasi karakteristik material kristalit yang dilihat dari struktur (kualitatif), fasa (kuantitatif), ataupun ukuran butir dari sebuah sampel dengan menggunakan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X. Sinar-X adalah gelombang elektromagnetik yang dapat digunakan untuk mengetahui struktur kristal dan fase material. Jika sinar-X dengan panjang λ maka gelombang diarahkan ke permukaan kristal dengan sudut datang sehingga beberapa sinar dihamburkan oleh bidang atom dalam kristal. Berkas sinar-X yang tersebar pada arah tertentu akan menghasilkan puncak difraksi dan dapat diamati dengan perangkat XRD.

Pada umumnya, sinar diciptakan dengan percepatan arus listrik, atau setara dengan transisi kuantum partikel dari satu energi ke energi lainnya. Sinar-X merupakan radiasi elektromagnetik yang memiliki energi tinggi sekitar 200 eV sampai 1 MeV. Sinar-X dihasilkan oleh interaksi antara berkas elektron eksternal dengan elektron pada kulit atom. Spektrum Sinar-X memiliki panjang gelombang 5-10 nm, berfrekuensi 10¹⁷-10²⁰ Hz dan memiliki energi 10³-10⁶ eV. Panjang gelombang sinar X memiliki orde yang sama dengan jarak antar atom sehingga dapat digunakan sebagai sumber difraksi kristal. Cara kerja alat *X-ray diffraction* dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5. Kerja alat *X-ray diffraction* (Jamaludin, 2010).

Gambar 2.5. Merupakan kerja alat difraksi sinar-X yaitu tabung sinar-X mengeluarkan sinar-X yang difokuskan dan mengenai sampel oleh pemfokus kemudian detektor segera bergerak sepanjang lintasannya untuk merekam pola difraksi sinar-X. Difraksi adalah hasil korelasi antar dua gelombang atau lebih. Sinar-X tersebut menembak sampel padatan kristalin, kemudian mendifraksikan sinar ke segala arah dengan memenuhi Hukum Bragg. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan

untuk mendeteksi berkas sinar-X yang didifraksikan oleh sampel. Sampel serbuk atau padatan kristalin memiliki bidang-bidang kisi yang tersusun secara acak dengan berbagai kemungkinan orientasi, begitu pula partikel-partikel kristal yang terdapat didalamnya. Setiap kumpulan bidang kisi tersebut memiliki beberapa sudut orientasi sudut tertentu, sehingga difraksi sinar-X memenuhi Hukum Bragg.

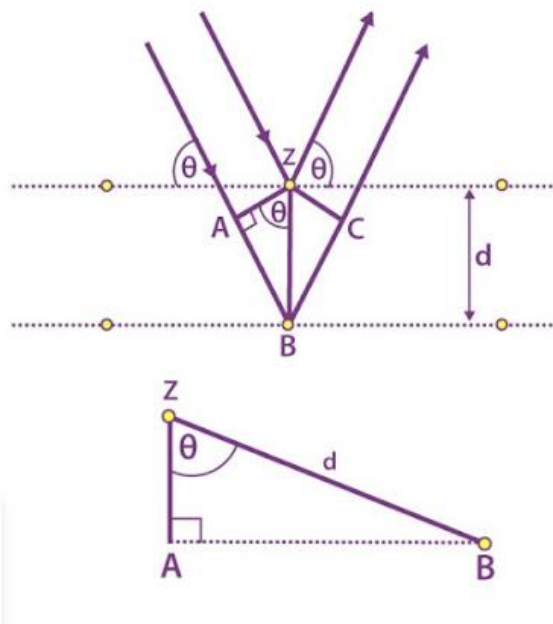
Hukum Bragg dapat menentukan sudut hamburan koheren dan inkoheren dari kisi kristal yg diperkenalkan oleh William Lawrence Bragg. William Lawrence Bragg adalah seorang fisikawan Australia-Inggris (1890-1971), Ia adalah putera sulung fisikawan William H. Bragg. William L. Bragg memulai studi perguruan tinggi dalam matematika di Australia, lalu pindah ke Cambridge, Cambridgeshire, di mana ia mengubah fokusnya ke fisika. Pada tahun 1915, bersama mereka menerima Penghargaan Nobel dalam Fisika kepada karya mereka dalam kristalografi sinar X. Bragg dianugerahi Hadiah Nobel dalam Fisika untuk mengidentifikasi struktur kristal dimulai dengan NaCl, ZnS, dan berlian. Selain itu, untuk memahami struktur setiap keadaan material oleh berkas apapun, misalnya ion, proton, elektron, neutron, dengan panjang gelombang yang sama dengan panjang antara struktur molekul, maka analisis difraksi mulai dari difraksi kristal tunggal hingga difraksi multi kristal dikembangkan sampai saat ini (Fahlepy, 2022).

Ketika sinar-X mengenai atom tertentu, mereka membuat awan elektronik bergerak seperti gelombang elektromagnetik. Pergerakan muatan ini memancarkan gelombang lagi dengan frekuensi yang sama, sedikit buram

karena efek yang berbeda, dan fenomena ini dikenal sebagai hamburan Rayleigh. Pada dasarnya, hukum ini menjelaskan hubungan antara pemotretan sinar-X dan pantulannya dari permukaan kristal. Hukum Bragg menyatakan sebagai berikut: “Ketika sinar-X mengenai permukaan kristal, sudut datangnya, akan dipantulkan dengan sudut hamburan yang sama, dan ketika beda lintasan, d sama dengan bilangan bulat, n , dengan panjang gelombang, interferensi konstruktif akan terjadi”.

Proses yang tepat terjadi pada hamburan gelombang neutron melalui inti atau interaksi spin koheren dengan elektron terisolasi. Medan gelombang yang dipancarkan kembali ini saling mengganggu secara destruktif atau konstruktif, menciptakan pola difraksi pada film atau detektor. Analisis difraksi adalah interferensi gelombang yang dihasilkan, dan analisis ini dikenal sebagai difraksi Bragg (Fahlepy, 2022).

Penurunan persamaan Hukum Bragg, dapat dijelaskan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Diagram sudut pada Hukum Bragg (Fahlepy, 2022).

Gambar 2.6, diagram di mana fase blok bertepatan ketika sudut datang sama dengan sudut pantul. Blok datang sejajar satu sama lain sampai mencapai titik z. Ketika mereka berada di titik z, mereka menumbuk permukaan dan bergerak ke atas. Di titik B, sinar kedua menyebar. $AB + BC$ adalah jarak yang ditempuh oleh sinar kedua. Jarak ekstra dikenal sebagai kelipatan integral dari panjang gelombang.

$$n\lambda = AB + BC \quad (2.1)$$

dimana ; $AB = BC$, maka

$$n\lambda = 2AB \quad (2.2)$$

d adalah hipotenusa segitiga siku-siku ABZ.

$$AB = d \sin\theta \quad (2.3)$$

Substitusi persamaan 2.2 ke persamaan 2.3

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2.4)$$

Persamaan di atas adalah ekspresi hukum Bragg (Fahlepy, 2022).

Dengan $2d$ adalah jarak antar bidang dalam kristal, θ adalah sudut difraksi, n adalah orde difraksi (0,1,2,3...) dan λ adalah panjang gelombang. Prinsip dasar penentuan struktur adalah dengan teknik difraksi sinar-X karakteristik, dimana berlaku hukum Bragg (persamaan 2.4).

Berdasarkan persamaan (2.4) Bragg jika seberkas sinar-X di jatuhkan pada sampel kristal, maka bidang kristal tersebut akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang sebesar jarak antar kisi dalam kristal tersebut. Sinar-X yang dibiaskan akan ditangkap oleh detektor kemudian disebut sebagai sebuah puncak difraksi. Semakin banyak bidang kristal

yang terdapat di dalam sampel, makin kuat intensitas pembiasan yang dihasilkannya (Jamaludin, 2010).

Secara sederhana, prinsip kerja dari XRD dapat dijelaskan sebagai berikut. Setiap senyawa terdiri dari susunan atom-atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk yang tertentu, maka partikel cahaya (foton) yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan maupun pembiasan yang khas. Dengan kata lain, tidak mungkin foton yang datang dengan sudut tertentu pada sebuah bidang dengan bentuk tertentu akan menghasilkan pola pantulan ataupun pembiasan yang bermacam-macam. Sebagai gambaran, bayangan sebuah objek akan membentuk pola yang sama seandainya cahaya berasal dari sudut datang yang sama. Kekhasan pola difraksi yang tercipta inilah yang dijadikan landasan dalam analisa kualitatif untuk membedakan suatu senyawa dengan senyawa yang lain menggunakan instrumen XRD. Pola unik yang terbentuk untuk setiap difraksi cahaya pada suatu material seperti halnya *fingerprint* (sidik jari) yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi senyawa yang berbeda.

2.7.3 Densitas

Densitas merupakan ukuran kerapatan suatu zat yang dinyatakan banyaknya massa partikel yang dibagi dengan total volume yang ditempati dengan satuan g/cm^3 . Pengukuran densitas dapat dilakukan dengan menggunakan prinsip hukum Archimedes. Hukum Archimedes ditemukan oleh Archimedes (287-212 SM), seorang ilmuwan Yunani yang juga merupakan penemu pompa spiral untuk menaikkan air yang dikenal dengan

istilah sekrup Archimede. Hukum Archimedes berhubungan dengan gaya berat dan gaya ke atas suatu benda jika dimasukkan kedalam air. Dasar pemikiran Archimedes; “jika dalam sebuah tempat ada air dan air dalam keadaan tenang, maka di seluruh bagian air tekanannya sama. Kalau ada daerah yang tekanannya berbeda, maka air dari tempat yang tekanannya tinggi mengalir ke arah yang tekanannya rendah. Jika benda dimasukkan ke dalam air dan setelah airnya tenang kembali benda terapung, keadaan itu menunjukkan bahwa tekanannya menjadi sama di mana-mana, termasuk di tempat benda tersebut berada. Ini berarti tekanan yang diduduki benda itu seharusnya sama dengan tekanan di bagian air yang lain atau air yang seharusnya ada disitulah yang sama dengan air yang terdesak oleh benda”. Dalam penyusunan percobaannya Archimedes menggunakan pengetahuan tentang timbangan. Akhirnya dapat ditentukan bahwa teorinya sesuai dengan hasil percobaan, yaitu:” benda yang terapung atau terendam dalam air kehilangan berat sesuai dengan berat air yang terdesak”. Prinsip Archimedes mengatakan bahwa setiap benda yang tercelup sebagian atau seluruhnya ke dalam fluida, akan mendapat gaya ke atas sebesar berat fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Benda yang dicelupkan ke dalam air maka ada tiga kemungkinan yang akan dialami oleh benda tersebut yaitu mengapung, melayang dan tenggelam. Keadaan tenggelam terjadi pada saat massa jenis zat cair lebih kecil daripada massa jenis benda. Sebagai contoh adalah baja akan tenggelam didalam air dikarenakan massa jenis baja lebih besar daripada massa jenis air. Pada keadaan tenggelam berat benda di dalam cairan lebih besar

daripada berat jenis air dan gaya ke atas. Gaya tekan air (massa jenis air) < berat benda (massa jenis benda) (studioliterasi, 2022).

Keadaan melayang dapat terjadi jika massa jenis zat cair sama dengan massa jenis benda. Benda akan melayang di antara dasar bejana dan permukaan cairan atau berada ditengah tengah. Sebagai contoh adalah pada saat telur dimasukan ke air dan ditambahkan sedikit garam maka telur akan melayang karena massa jenisnya sama. Gaya tekan air (massa jenis air) = berat benda (massa jenis benda) (studioliterasi, 2022).

Keadaan terapung dapat terjadi ketika massa jenis zat cair lebih besar dibandingkan massa jenis benda. Contohnya yaitu pada stereofom yang akan terapung pada saat dimasukan ke air. Gaya tekan air (massa jenis air) > berat benda (massa jenis benda) (studioliterasi, 2022).

Nilai densitas dipengaruhi oleh beberapa hal yaitu ukuran dan berat atom suatu elemen, kuatnya pengepakan atom dan struktur kristal serta besarnya nilai porositas dalam mikrostruktur (Richerson, 1992).

Pengukuran densitas suatu material dapat diperoleh dengan persamaan (2.5).

$$\rho = \frac{(m_u - m_{\text{acetone}})}{m_{\text{acetone}}} \times \rho_{\text{acetone}} \quad (2.5)$$

dimana, ρ sebagai densitas (g/cm^3), ρ_{acetone} sebagai nilai densitas *acetone* (g/cm^3), m_u sebagai massa jenuh atau massa sampel kering ditimbang di udara (g), dan m_{acetone} sebagai massa basah sampel dalam *acetone* (g) (Saparuddin *et al*, 2020).

2.7.4 Porositas

Porositas merupakan perbandingan antara volume ruang yang ada diantara serbuk yang terdiri pori-pori terhadap volume serbuk secara keseluruhan. Pori-pori yang dimaksud adalah ruang diantara serbuk yang selalu terisi oleh fluida seperti udara, minyak atau gas bumi. Porositas batuan adalah rasio volume rongga-rongga pori terhadap volume keseluruhan batuan yang dinyatakan dalam persen. Porositas dipengaruhi oleh ukuran bahan, jenis batuan, komposisi, distribusi pori, dan sementasi. Sebuah batuan dianggap mempunyai porositas yang baik jika bagian rongga-rongga pada batuan saling berhubungan dan umumnya lebih kecil dari rongga-rongga pori (Ridha dan Darminto, 2016).

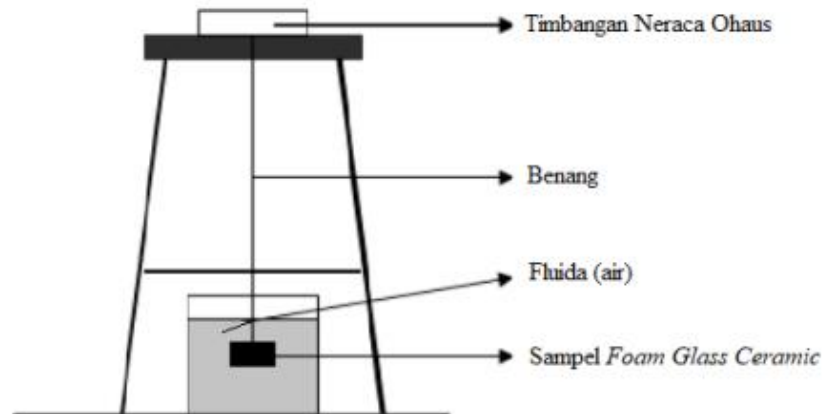
Terdapat dua jenis porositas yaitu porositas absolut dan porositas efektif. Porositas absolut adalah perbandingan suatu rongga pori terhadap volume total seluruh batuan. Sedangkan porositas efektif adalah perbandingan suatu rongga pori yang saling terhubung terhadap volume total seluruh batuan.

Untuk menentukan besar porositas yang dihasilkan dapat menggunakan Persamaan (2.6) yang sesuai dengan ASTM C 642-97:

$$\varphi = \frac{m_w - m_o}{m_w - m_s} \times 100 \quad (2.6)$$

Dengan φ adalah porositas sampel (%), m_o adalah massa sampel kering (g), m_s adalah massa sampel jenuh dalam air (g) dan m_w adalah massa sampel jenuh (g) (Mardiah *et al*, 2018).

Alat uji porositas dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Alat uji porositas (Sulardjaka *et al*, 2013).

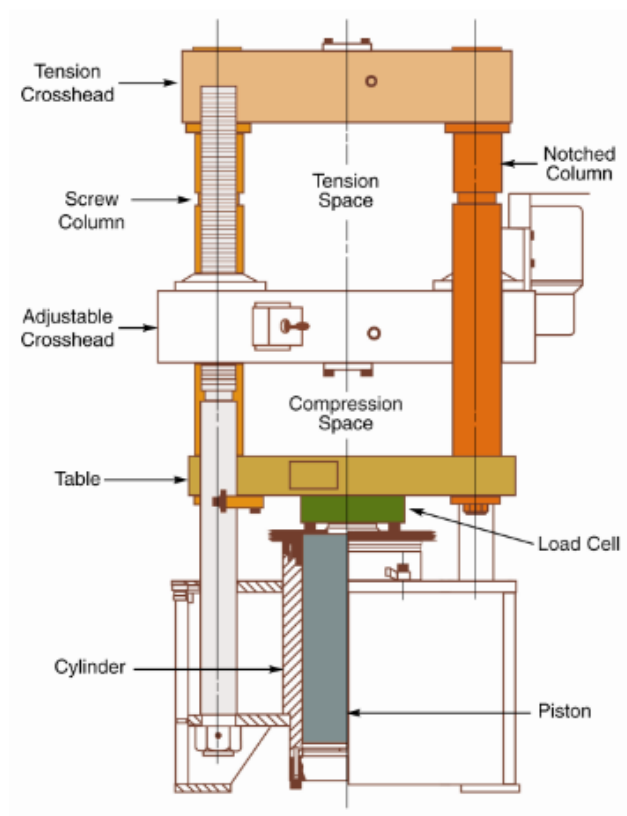
2.7.5 Kuat Tekan

Uji kuat tekan (*compressive strength*) berfungsi untuk mengetahui kekuatan bahan terhadap gaya tekan. Caranya adalah dengan memberikan gaya tekan kepada bahan uji. Kekuatan bahan adalah besarnya gaya yang diberikan pada saat terjadi perpatahan. Kekuatan dari suatu material sering dianggap sama dan identik dengan tegangan, dimana kekuatan bahan dinyatakan dengan satuan gaya per satuan luas penampang dari bahan dan inilah yang disebut tegangan. Tegangan tekan berlawanan dengan tegangan tarik. Jika pada tegangan tarik, arah kedua gaya menjauhi ujung benda (kedua gaya saling berjauhan), maka pada tegangan tekan, arah kedua gaya saling mendekati. Dengan kata lain benda tidak di tarik tetapi di tekan (gaya-gaya bekerja di dalam benda).

Kekuatan tekan material adalah nilai tegangan tekan uniaksial yang mempunyai modulus kegagalan ketika saat pengujian. Perubahan bentuk benda yang disebabkan oleh tegangan tekan dinamakan mampatan.

Misalnya pada tiang-tiang yang menopang beban, seperti tiang bangunan mengalami tegangan tekan.

Kekuatan tekan biasanya diperoleh dari percobaan dengan alat pengujian tekan. Ketika dalam pengujian nantinya, spesimen akan menjadi lebih mengecil seperti menyebar lateral. *Universal Testing Machine (UTM)* merupakan suatu alat uji untuk mengukur tingkat kekuatan suatu bahan atau material. Alat ini digunakan untuk uji tarik (*tensile test*) dan uji tekan (*compression test*) suatu material.



Gambar 2.8. Skema diagram mesin UTM (Johri *et al*, 2018).

Persamaan untuk pengujian kuat tekan dengan menggunakan UTM adalah sebagai berikut :

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.7)$$

Dengan P adalah kuat tekan (N/m^2), F adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas bidang permukaan (m^2).

2.7.6 Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM)

Field Emission Scanning Electron Microscope (FESEM) adalah mikroskop elektron yang menggunakan emisi medan pada perangkat *electron gun*. Perbedaan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan FESEM adalah pada jenis sumber yang digunakan, SEM menggunakan emiter termionik (*thermionic emitter*), sedangkan FESEM menggunakan emiter bidang (*field emitter*). *Thermionic emitter* menggunakan panas untuk memanaskan filamen, dua bahan yang umumnya dipakai sebagai filamen adalah tungsten (W) dan Lanthanum Hexaboride (LaB_6). Ketika panas tungsten sudah cukup untuk memenuhi energi ambang filamen (katoda), maka elektron dapat tereksitasi dari filamen tersebut. Sumber termionik memiliki beberapa kelemahan, diantaranya; kecerahan yang relatif rendah, terjadinya penguapan dari katoda dan terjadinya konduksi panas selama pengoperasian (Masta, 2020).

Penggunaan emiter medan pada *electron gun* pada FESEM dapat mengatasi tiga kelemahan emitor termionik. Emitor medan (FE) tidak memanaskan filamen, sehingga disebut juga sebagai *Cold Electron Gun*.

Emisi elektron dicapai dengan menempatkan filamen pada gradien potensial yang besar.

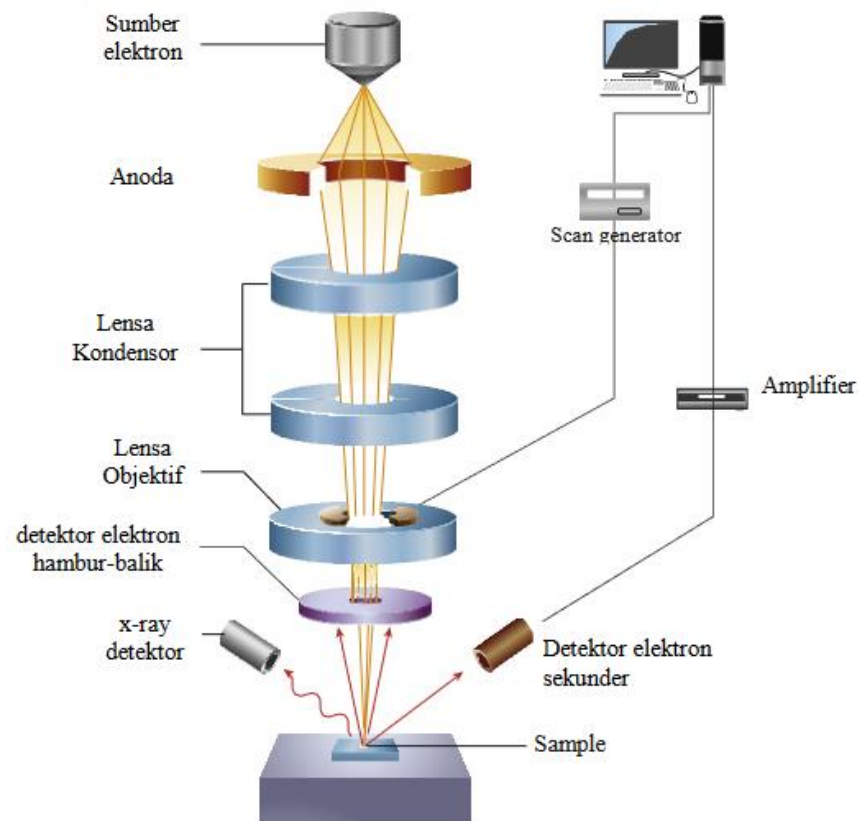
Pada FESEM, material yang digunakan sebagai filamen adalah tungsten (W) yang didesain dengan ujung lancip dengan radius nanoskala ($\sim 100\text{ nm}$). Ujung lancip ini dibuat agar medan listrik dapat dikonsentrasikan pada tingkat yang ekstrim, menjadi sangat besar sehingga mengatasi energi ambangnya, sehingga elektron dapat tereksitasi dari filamen (katoda).

Emisi bidang yang dihasilkan FESEM memiliki diameter penampang bidang yang lebih kecil daripada emitor termionik. Hal ini mengakibatkan sumber emisi medan yang dihasilkan menjadi lebih mudah difokuskan oleh lensa kondensator. Inilah yang mengakibatkan FESEM memiliki sedikit distorsi elektrostatik dan resolusi yang tajam ($< 2\text{ nm}$), yang artinya lebih baik hingga 6 kali daripada SEM. Dengan demikian FESEM menghasilkan image yang lebih jelas dari pada SEM (Masta, 2020).

FESEM adalah instrumen seperti halnya SEM, menyediakan berbagai informasi dari permukaan sampel, tetapi dengan resolusi yang lebih tinggi dan rentang energi yang jauh lebih besar (Linder *et al*, 1992) FESEM bekerja seperti SEM konvensional; permukaan sampel dipindai dengan berkas elektron sementara monitor menampilkan informasi berdasarkan detektor yang tersedia (Kiefer *et al*, 1997).

Metode pengoperasian mikroskop ini mirip dengan mikroskop elektron pemindaian konvensional (SEM). Berkas elektron yang difokuskan oleh lensa elektromagnetik memindai permukaan spesimen, di mana elektron

yang dipantulkan/ berinteraksi membuat gambar permukaan dan topografi sampel sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9. Skema diagram mesin FESEM (Inkson, 2016).

III. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini menjelaskan tentang waktu dan tempat penelitian serta prosedur penelitian yang akan dilakukan dalam membuat *foam glass-ceramic* berbasis bahan baku padat limbah industri. Adapun dalam bagian ini akan disajikan cara kerja penelitian yang telah dilakukan.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Proses penelitian dilakukan mulai bulan Oktober 2022-Mei 2023 yang bertempat di Laboratorium Non Logam, Laboratorium *Heat Treatment* dan Laboratorium Analisis Pusat Riset Teknologi Pertambangan, Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN) Kawasan Lampung. Untuk uji karakterisasi seperti FESEM, XRD, XRF, uji densitas, uji porositas, dan uji mekanis (kuat tekan) dilakukan di Laboratorium Analisis BRIN Kawasan Serpong, BRIN Kawasan Lampung dan BRIN Kawasan Cibinong.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat-alat yang digunakan didalam penelitian ini secara umum terbagi menjadi dua yaitu: yang pertama meliputi alat-alat proses seperti *furnace* dengan suhu mencapai 1.200°C, *ball mill* yang berfungsi sebagai alat penggerus, ayakan lolos 325 mesh, alat tekan hidrolik, oven listrik 120°C dan timbangan analitik. Kedua,

alat-alat karakterisasi seperti XRD merk Panalytical Xpert 3 Powder XRD, XRF Epsilon 4 XRF Spectrometer dari Malvern Panalytical, FESEM-EDX dengan merk Thermoscientific- Quattro, *Universal Testing Machine* (UTM) Shimadzu AGS-X series 10 kN.

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah *stone crusher* batuan basal dari Sukadana, Lampung Timur, limbah pembakaran batubara (abu terbang) PLTU Sebalang, Lampung Selatan, limbah botol kaca berwarna bening yang diperoleh dari pengepul barang bekas di Bandar Lampung, dan limbah pengecoran aluminium dari usaha pengecoran logam di Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.3 Proses Pembuatan *Foam Glass-Ceramic*

Proses pembuatan *foam glass-ceramic* di bagi menjadi beberapa tahapan, diantaranya:

3.3.1 Preparasi Bahan Baku

Proses pembuatan *foam glass-ceramic* diawali dengan proses peremukan limbah botol kaca, batuan basal dan aluminium *dross* menggunakan *jaw crusher* untuk mendapatkan ukuran material kurang dari 2 cm. Kemudian material hasil dari *jaw crusher* dilanjutkan proses penggerusan menggunakan *ball mill* selama 24 jam untuk mendapatkan material dengan ukuran lolos ayakan 200 mesh. Sementara perlakuan awal terhadap abu terbang dilakukan dengan proses pengayakan untuk mendapatkan bahan dengan ukuran lolos ayakan 200 mesh. Hal ini dikarenakan material abu terbang yang didapatkan sudah berbentuk serbuk halus, sehingga tidak diperlukan proses peremukan dan penggerusan. Setelah didapatkan bahan baku berupa limbah botol kaca, batuan basal, abu terbang dan aluminium *dross*

dengan ukuran lolos 200 mesh, dilakukan tahapan selanjutnya berupa pencampuran bahan baku dengan komposisi tertentu.

3.3.2 Proses Pencampuran Bahan Baku

Proses pencampuran bahan baku diawali dengan uji komposisi kimia bahan dengan menggunakan XRF Epsilon 4 X-RF Spectrometer dari *Malvern Panalytical* yang beroperasi pada tegangan 30 kV dan arus 0,250 mA. Dilanjutkan dengan analisa XRD dengan merk Panalytical Xpert 3 Powder XRD dengan $Cu-K\alpha$ sebagai sumber sinar-X yang beroperasi pada tegangan 40 kV dan arus 20 mA. Sampel uji di *scan* dengan sudut 2θ dari 20-80°. Kemudian dilakukan proses pencampuran bahan baku dengan komposisi seperti terlihat pada Tabel 3.1. Proses pencampuran bahan baku dilakukan dengan proses kering menggunakan *ball mill* selama 30 menit. Kemudian material yang telah tercampur di cetak menggunakan mesin *press* hidrolik dengan cetakan silinder berdiameter 20 mm dan ketebalan 2 mm, dengan tekanan 100 kg/cm².

Tabel 3.1. Komposisi Campuran Bahan

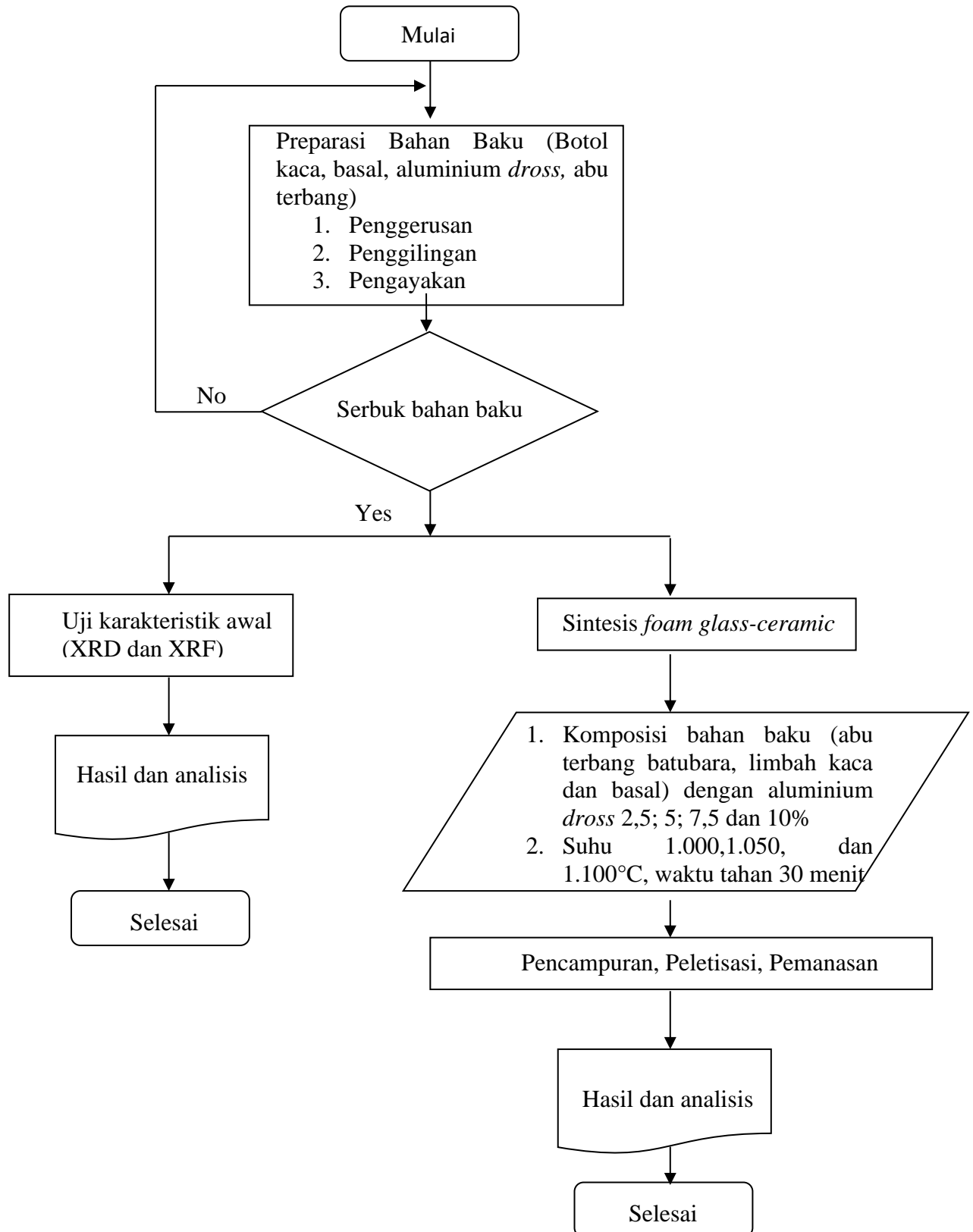
Nama Sampel	Abu Terbang (% berat)	Basal (% berat)	Foam Agent (% berat)	Limbah Kaca (% berat)
FG0	40	5,00	0,00	55,00
FG2,5	39	4,88	2,50	53,62
FG5	38	4,75	5,00	52,25
FG7,5	37	4,62	7,50	50,88
FG10	36	4,50	10,00	49,50

3.3.3 Proses Pemanasan

Proses pemanasan dilakukan setelah didapatkan hasil pencampuran bahan baku yang kemudian dicetak dalam bentuk pelet. Pelet tersebut dipanaskan menggunakan *muffle furnace* dengan suhu proses 1.000; 1.050 dan 1.100°C untuk

masing-masing komposisi seperti pada Tabel 3.1. Proses pemanasan dilakukan dengan laju pemanasan $10^{\circ}\text{C}/\text{menit}$, dan dilakukan panahanan selama 30 menit, yang dilanjutkan dengan proses pendinginan. Proses pendinginan dilakukan dengan proses lambat di dalam *furnace* sampai pada suhu 32°C .

Secara garis besar, tahapan-tahapan yang dilakukan pada penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.4 Karakterisasi XRF, XRD, Uji Fisis, Uji Mekanik dan FESEM

3.4.1 Karakterisasi XRF

Karakterisasi XRF pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui komposisi senyawa kimia yang terdapat pada bahan baku (abu terbang batubara, basal, limbah botol kaca dan aluminium *dross*) dan sampel *foam glass-ceramic* yang dihasilkan.

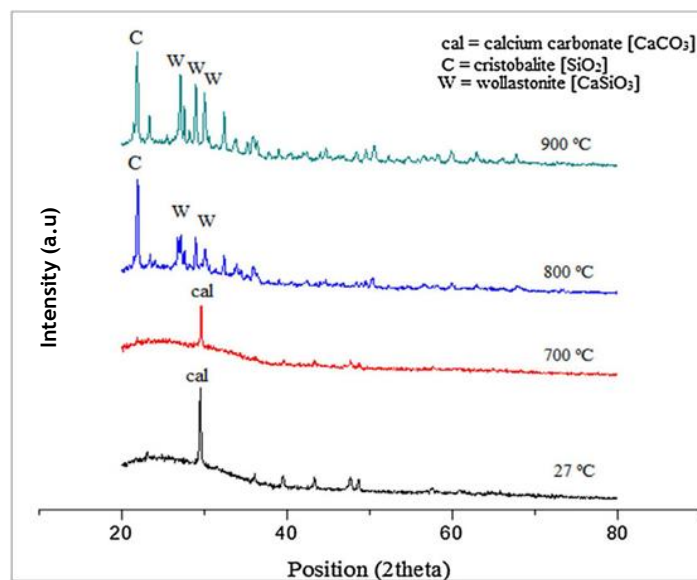
Proses karakterisasi XRF diawali dengan menyiapkan sampel serbuk bahan baku (basal, limbah kaca, abu terbang dan aluminium *dross*) lolos 325 mesh. Serbuk sampel tersebut dimasukan ke dalam tabung sampel sebanyak $\pm 1/3$ ketinggian tabung sampel. Sampel di tekan hingga permukaan rata. Menyalakan XRF dan UPS, tunggu hingga beberapa saat, baru kemudian kunci diputar ke arah *on*. Kunci alat XRF searah jarum jam sebesar 90° . Tabung sampel dimasukan ke dalam alat XRF dan menjalankan program Epsilon dalam komputer. Pengukuran sampel dimulai, sampai selesai dengan menganalisa spektrogram yang dihasilkan.

Dari data yang dihasilkan melalui analisis XRF akan dilakukan pembahasan terkait pengaruh senyawa/unsur yang terkandung di dalam bahan baku terhadap proses pembuatan/produk *foam glass-ceramic*.

3.4.2 Karakterisasi XRD

Karakterisasi XRD pada penelitian ini dilakukan untuk fasa kristalin yang terdapat di dalam bahan baku dan produk *foam glass-ceramic* yang dihasilkan. Proses karakterisasi XRD dilakukan dengan menyiapkan sampel yang akan dianalisa, baik sebelum pemanasan maupun setelah pemanasan sebanyak ± 2 gram. Sampel

tersebut diletakkan pada sampel *holder* kemudian diratakan menggunakan kaca. Memasukkan sampel tersebut ke dalam difraktometer untuk kemudian dilakukan penembakan dengan sinar-X. Pengujian difraksi akan terjadi ketika sinar-X meradiasi sampel yang terpancar dari target Cu dengan panjang gelombang 1,5406 Å. Setelah pengukuran selesai maka akan diperoleh data hasil difraksi dalam bentuk *soft data* yang bentuk file *xrdml*. Data file yang diperoleh akan diolah menggunakan *software high score plus v.3.0.5* (HSP) untuk mengetahui fasa kristalin yang terbentuk. Hasil analisis XRD ini akan dibahas terkait pengaruhnya fasa kristalin yang terdapat di dalam bahan baku maupun *foam glass-ceramic* yang terbentuk terhadap proses/sifat bahan baku dan *foam glass-ceramic*. Seperti yang dilakukan oleh Saparuddin *et al*, (2020) dalam penelitiannya menunjukkan pola XRD masing-masing *foam glass-ceramic* yang terbentuk terhadap suhu pemanasan, seperti terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2. Pola XRD dari foam glass-ceramic yang dipanaskan pada berbagai suhu (Saparuddin *et al*, 2020).

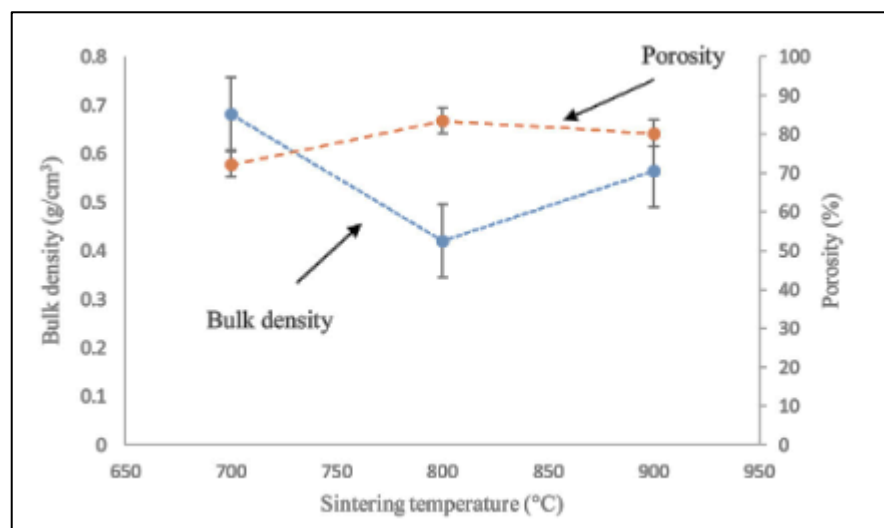
Berdasarkan Gambar 3.3, sampel tanpa proses pemanasan hanya menunjukkan puncak dalam bentuk kristal kalsium karbonat (CaCO_3 , 96-901-6707). Ketika dipanaskan pada suhu 700°C , hanya ada puncak lemah yang terdeteksi sebagai CaCO_3 dengan fase amorf. Dengan kenaikan suhu pemanasan sampai 800°C terjadi penampakan fasa kristobalit (SiO_2 , 96-900-9688) dan tumbuhnya fasa *wollastonite* (CaSiO_3 , 96-900-5778) sedangkan pada suhu pemanasan 900°C terjadi peningkatan jumlah puncak yang cukup besar. Peningkatan puncak tersebut adalah fasa *wollastonite* (CaSiO_3 , 96-900-5778) serta pertumbuhan kristal kristobalit (Saparuddin *et al*, 2020).

3.4.3 Uji Densitas dan Porositas

Pengujian densitas pada penelitian ini menggunakan prinsip hukum Archimedes, pengujian densitas dilakukan untuk menentukan nilai rapatan suatu material (sampel). Proses pengujian dilakukan dengan cara menyiapkan sampel *foam glass-ceramic*. Menimbang sampel *foam glass-ceramic* menggunakan neraca digital untuk mengetahui massa kering sampel (m_k). Menyiapkan *beaker glass* yang telah di isi aquades. Memasukkan sampel *foam glass-ceramic* ke dalam *beaker glass* tersebut, dan dilakukan selama 1 jam. Sampel *foam glass-ceramic* dibersihkan menggunakan tisu, kemudian ditimbang dengan neraca digital untuk mengetahui massa jenuh (m_u) sampel. Setelah massa jenuh (m_u) sampel *foam glass-ceramic* diperoleh, kemudian sampel massa jenuh (m_u) diikat dengan benang dan digantung ditengah-tengah *beaker glass* yang berisi acetone, untuk mendapatkan massa gantung (m_{acetone}) sampel. Menghitung besarnya densitas dan porositas masing-masing sampel *foam glass-ceramic* dengan menggunakan persamaan 2.5 dan persamaan 2.6.

Nilai densitas dan porositas akan dilakukan pembahasan terkait pengaruh proses sintering terhadap produk *foam glass-ceramic* yang dihasilkan. Hal ini seperti yang dilakukan oleh Saparuddin *et al*, (2020) dalam penelitiannya mengilustrasikan pengaruh berbagai perlakuan suhu pada pengembangan ekspansi volumetrik dan densitas sampel *foam glass-ceramic*. Massa jenis *foam glass-ceramic* menurun dari 0,682 menjadi 0,421 g/cm³ ketika dipanaskan pada suhu 700 dan 800°C. Namun, terjadi perubahan tren densitas ketika sampel dipanaskan pada suhu 900°C, densitas sampel masing-masing meningkat menjadi 0,565 g/cm³. Kenaikan suhu *sintering* tidak selalu menyebabkan nilai densitas yang dihasilkan mengalami penurunan.

Gambar 3.4, menunjukkan dengan jelas bahwa perkembangan porositas bergantung pada tren densitas. Pada suhu pemanasan antara 700 dan 900°C, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.3, ekspansi volumetrik menurun seiring dengan peningkatan kerapatan massal (Saparuddin *et al*, 2020).



Gambar 3.3. Hasil densitas dan porositas foam glass-ceramic dipanaskan pada berbagai suhu selama 60 menit (Saparuddin *et al*, 2020).

3.4.4 Uji Kuat Tekan

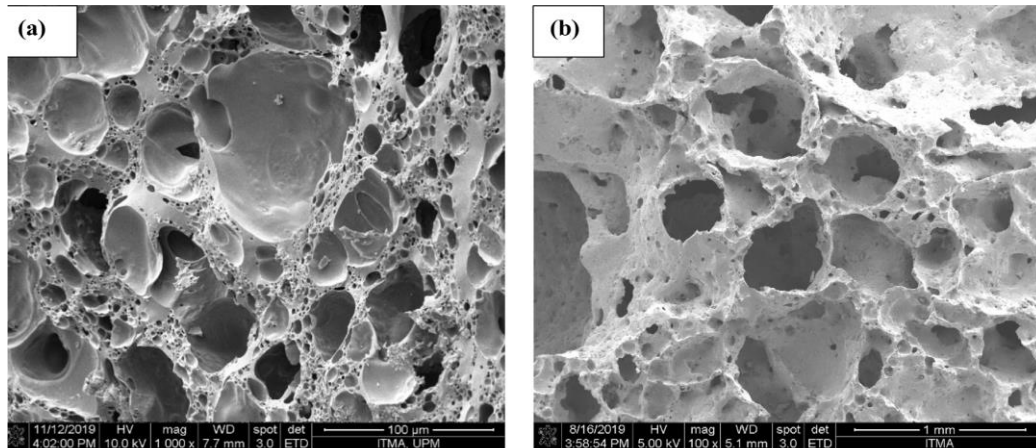
Pengujian kuat tekan pada penelitian ini menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Langkah kerja uji kuat tekan dilakukan dengan bantuan software UTM 10kN, dengan pilihan menu program *compressive*. Parameter yang ditetapkan meliputi; kecepatan penekanan, satuan beban penekanan (Kg atau F), ukuran *specimen* (diameter: mm atau cm). Dalam menjalankan mesin, proses pengujian dilakukan melalui sistem otomatis. Mesin akan menekan benda *specimen* secara otomatis hingga pecah atau tidak mampu menerima beban lagi dan mesin akan berhenti. Akan didapatkan nilai kuat tekan, dan dianalisis pengaruhnya terhadap proses atau sifat produk *foam glass-ceramic*.

3.4.5 Karakterisasi *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM)

Karakterisasi FESEM pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui morfologi sampel *foam glass-ceramic*. Dalam melakukan uji FESEM, sampel terlebih dahulu dilakukan proses pemolesan (*polishing*) yang dilanjutkan dengan *coating* sampel. Kemudian sampel dimasukkan ke dalam *chamber*, dan mulai dilakukan pengamatan sampel, dengan mencari spot atau titik daerah yang akan diamati. Untuk mendapatkan gambar yang diinginkan, perbesaran dapat dilakukan mulai dari 100 X diiringi dengan memfokuskan gambar sampai diperoleh gambar yang diinginkan. *Capture* untuk mengambil gambar hasil FESEM dan dianalisis. Hasil gambar FESEM ini kemudian dapat digunakan juga dalam menentukan ukuran diameter pori dengan menggunakan bantuan software ImageJ.

Pembahasan analisis FESEM dapat dilakukan seperti penelitian Saparuddin *et al*, (2020), dalam penelitiannya melakukan analisis struktur mikro dalam penampang

paralel *foam glass-ceramic* pada suhu 700, dan 800°C seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.4.



Gambar 3.4. Hasil FESEM *foam glass-ceramic* yang dipanaskan pada suhu (a) 700°C (b) 800°C (Saparuddin *et al*, 2020).

Dari gambar 3.4(a) menunjukkan bahwa proses *sintering* yang dilakukan pada suhu 700°C, pori-pori *foam glass-ceramic* yang dihasilkan berbentuk bola dengan kecenderungan homogen dan diameter poros berukuran kecil. Porositas yang dihasilkan pada suhu *sintering* 700°C merupakan porositas tertutup. Dengan terjadinya peningkatan suhu *sintering* hingga 800°C, pori-pori *foam glass-ceramic* yang terbentuk menjadi lebih besar dengan ukuran di kisaran 250–350 μm seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 3.4(b). Peningkatan suhu *sintering* menyebabkan terjadinya perubahan bentuk porositas, yang sebelumnya berbentuk bola dan tertutup menjadi bentuk yang tidak teratur dan terbuka (Saparuddin *et al*, 2020).

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan tujuan dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Limbah padat industri (basal, limbah botol kaca, dan abu terbang batubara) dapat digunakan sebagai bahan baku dengan aluminium *dross* dapat digunakan sebagai *foaming agent* pada pembuatan *foam glass-ceramic* dengan teknologi pemanasan serbuk pada rentang suhu sintering 1.000-1.100 °C.
2. Kenaikan suhu sintering menampilkan tren “V” terhadap nilai densitas dimana kenaikan suhu sintering akan menyebabkan nilai densitas berkurang dan pada satu titik nilai densitas akan mengalami kenaikan kembali. Kenaikan suhu sintering akan menyebabkan peningkatan nilai porositas, dan nilai kuat tekan.

5.2 Saran

Untuk pengembangan penelitian ini lebih lanjut perlu dilakukan variasi ukuran partikel bahan baku untuk mengetahui pengaruhnya terhadap sifat mekanik dan sifat fisis *foam glass-ceramic*. Perlu dilakukan uji nilai konduktifitas thermal *foam glass-ceramic* yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel Alim, D. M. 2009. *Production and Characterization of Foam Glass from Container Glass Waste*. Thesis. The American University in Cairo. AUC Knowledge Fountain. 158 p.
- Achiou, B., Elomari, H., Bouazizi, A., Karim, A., Ouammou, M., Albizane, A., Bennazha, J., Alami Younssi, S. and El Amrani, I.E. 2017. Manufacturing of Tubular Ceramic Microfiltration Membrane Based on Natural Pozzolan for Pretreatment of Seawater Desalination. *Desalination*. 419: 181–187.
- Adeosun, S.O. 2014. Physical and Mechanical Properties of Aluminum Dross. *Advances in Materials*. 3(2): 6–10.
- Ahmaruzzaman, M. 2010. A Review on The Utilization of Fly Ash. *Progress in Energy and Combustion Science*. 36(3): 327-363.
- Ahmed, A.M., El-Amir., Mohammed, A.A.A., Newishy, M., Fend, T., and Emad, M.M.E., 2021. Aluminium Dross/Soda Lime Glass Waste-Derived High-Quality Glass Foam. *Journal of Materials Research and Technology*. 15: 4940-4948.
- Amin, M., Birawidha, D.C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Sumardi, S., Ario, S., Syafriadi., and Al-Muttaqi, M. 2019. The Influence of Basalt Minerals as Cement Substitution Materials in Mortar. *Acta Polytechnica*. 59(6): 536-542.
- Anggara, F., Petrus, H.T.B.M., Besari, D.A.A., Manurung, H. dan Saputra, F.Y.A. 2021. Tinjauan Pustaka Karakteristik dan Potensi Pemanfaatan Fly Ash dan Bottom Ash (FABA). *Buletin Sumber Daya Geologi*. 16(1): 53-70.
- Attila, Y., Güden, M. and Taşdemirci, A. 2013. Foam Glass Processing Using a Polishing Glass Powder Residue. *Ceramics International*. 3(5): 5869–5877.
- ASTM-C618-03, 2003. Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcinated Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concret. *Annual Books of ASTM standards*, USA.

- Bai, J., Yang X., Xu S., Jing W. and Yang J. 2014. Preparation of Foam Glass from Waste Glass and Fly Ash. *Materials Letters*. 136: 52-54.
- Bagaskara, A.P., 2018. *Analisis Perencanaan Transportasi Limbah Pembakaran Batubara Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) : Studi Kasus Wilayah Sumatera*. Tugas Akhir, Departemen Teknik Transportasi Laut Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya: 50-51.
- Bashar, S.M., Haruna, S., Wahab, M.M.A., Liew M.S., and Haruna, A. 2019. Mechanical and Microstructural Properties of High Calcium Fly Ash One Part Geopolymer Cement Made with Granular Activator. *Heliyon*. 5(e02255):1-9.
- Bayrak, G. and Yilmaz, S. 2014. Granite Based Glass-Ceramic Materials. *Proceedings of the 3rd International Congress APMAS, Acta Physica Polonica Series a*. 125(2): 623-625.
- Benhaoua, F., Ayadi, A., Stiti, N., Lamri, Y. and Ratni, H. 2015. Elaboration and Characterization of a Cellular Glass-Based Cullet Loaded with Carbon Fibers. *Materials Letters*. 160: 278–281.
- Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Amin, M. dan Al-Muttaqqi, M. 2019. The Analysis Comparison of Basalt via Melting Process from Mataram Baru (East Lampung) with Slow and Fast Cooling Method over XRD Approach. *Multitek Indonesia*. 13(2): 6–14.
- Birawidha, D.C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., and Amin, M. 2021. Study of Making Polyester Resin Matrix Composites Using Basalt Scoria Powder Fillers to Tensile Strength and Compressive Strength. *Sinergi*. 25(3): 299-308.
- Blissett, R.S. and Rowson, N.A. 2012. A Review of The Multi Component Utilisation of Coal Fly Ash. *Fuel*. 97: 1-23.
- Bojinova, D., and Teodosieva, R. 2016. Extraction of Elements from Coal Fly Ash Using Thermo-Hydrometallurgical Method. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*. 51(5): 577-587.
- Bouazizi, A., Saja, S., Achiou, B., Ouammou, M., Calvo, J.I., Aaddane, A. and Younssi, S.A. 2016. Elaboration and Characterization of a New Flat Ceramic MF Membrane Made from Natural Moroccan Bentonite. Application to Treatment of Industrial Wastewater. *Applied Clay Science*. 132–133: 33–40.
- Cengizler, H., Koç, M., and Şan, O. 2021. Production of Ceramic Glass Foam of Low Thermal Conductivity by a Simple Method Entirely From Fly Ash. *Ceramics International*. 47 (20): 28460-28470.
- Chen, B., Wang, K., Chen, X. and Anxian, Lu. 2012. Study of Foam Glass with High Content of Fly Ash Using Calcium Carbonate as Foaming Agent. *Materials Letters*. 15: 263-265.

- Chen, K., Li, X., Lv, D., Yu, F., Yin, Z.e. and Wu, T. 2011. Study on Microwave Absorption Properties of Metal-Containing Foam Glass. *Materials Science and Engineering: B*. 176(15):1239–1242.
- Chen, Z., Wang, H., Ji, R., Liu, L., Cheeseman, C. and Wang, X. 2019. Reuse of Mineral Wool Waste and Recycled Glass in Ceramic Foams. *Ceramics International*. 45(12): 5057–15064.
- Chiang, P.C. and Pan, S.Y. 2017. *Fly Ash, Bottom Ash, and Dust. In Carbon Dioxide Mineralization and Utilization*. Springer, Singapore.
- Damayanti, R. 2018. Abu Batubara dan Pemanfaatannya: Tinjauan Teknis Karakteristik Secara Kimia dan Toksikologinya. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 14(3): 213-231.
- Darweesh, H.H.M. 2019. Recycling of Glass Waste in Ceramics—part I: Physical, Mechanical and Thermal Properties. *SN Applied Sciences*.1:1274.
- Da Silva Fernandes F.A., Arcaro S., Junior E.F.T., Serra J.C.V. and Bergmann C.P. 2019. Glass Foams Produced from Soda-Lime Glass Waste and Rice Husk Ash Applied as Partial Substitutes for Concrete Aggregates. *Process Safety Environmental Protection*. 128: 77–84.
- Demir, I. 2009. Reuse of Waste Glass in Building Brick Production. *Waste Management & Research*. 27(6):572-577.
- Deng, Y., Li, J., Nian, H., Li, Y. and Yin, X. 2017. Design and Preparation of Shape Stabilized Composite Phase Change Material with High Thermal Reliability via Encapsulating Polyethylene Glycol Into Flower-like TiO₂ Nanostructure for Thermal Energy Storage. *Applied Thermal Engineering*. 114: 328–336.
- Departemen Pekerjaan Umum, SK SNI S-15-1990-F, Spesifikasi Abu Terbang Sebagai Bahan Tambahan Untuk Campuran Beton. Bandung: Yayasan LPMB.
- Ding, D., Wang, Y., Li, X., Qiang, R., Xu, P., Chu, W., Han, X. and Du, Y. 2017. Rational Design of Core-shell Co@C Microspheres for High-performance Microwave Absorption. *Carbon*. 111: 722–732.
- Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2022. Laporan Kinerja Tahun 2022. Jakarta, Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-direktorat-jenderal-mineral-dan-batubara-tahun-2022.pdf> di akses 12 Maret 2023.
- Doutres, O., Salissou, Y., Atalla, N. and Panneton, R. 2010. Evaluation of The Acoustic and Non-acoustic Properties of Sound Absorbing Materials Using a Three-Microphone Impedance Tube. *Applied Acoustics*. 71(6): 506–509.

- Edwin, F., dan Subari. 2017. Penyiapan Serbuk Korundum Titanium Karbida ($\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$) Sebagai Bahan Abrasif. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 13(3): 213-223.
- Eggenschwiler, P.D., Tsinoglou, D.N., Seyfert, J., Bach, C., Vogt, U. and Gorbar, M. 2009. Ceramic Foam Substrates for Automotive Catalyst Applications: Fluid Mechanic Analysis. *Experiments in Fluids*. 47(2): 209–222.
- El-Amir, A.A., Attia, M.A., Newishy, M., Fend, T. and Emad, M. 2021. Aluminium Dross/Soda Lime Glass Waste-Derived High-Quality Glass Foam. *Journal of Materials Research and Technology*. 15: 4940–4948.
- El-Amir, A.A.M., Attia, M.A.A., Fend, T., Ewais, E.M.M. 2022. Production of High-Quality Glass Foam from Soda Lime Glass Waste Using SiC-AlN Foaming Agent. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 59: 444–452.
- Elsarrag, E., Elhoweris, A. and Alhorr, Y. 2017. The Production of Hydrogen as an Alternative Energy Carrier from Aluminium Waste. *Energy, Sustainability and Society*. 7(9): 1-14.
- El-Shennawi, A.W.A., Mandour, M.A., Morsi, M.M., and Abdel-Hameed, S.A. 1999. Monopyroxenic Basalt-Based Glass-Ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*. 82: 1181–1186.
- Emeleus, C. H. and Troll, V. R. 2014. The Rum Igneous Centre Scotland. *Mineralogical Magazine*. 78(4): 805 – 839.
- Erol, M., Genc, A., Ovecoglu, M.L., Yucelen, E., Kucukbayrak, S., and Taptik, Y. 2000. Characterization of a Glass-Ceramic Produced from Thermal Power Plant Fly Ashes. *Journal of the European Ceramic Society*. 20: 2209-2214.
- Ewais, E.M.M., Attia, M.A.A., El-Amir, A.A.M., Elshenway, A.M.H. and Fend, T. 2018. Optimal Conditions and Significant Factors for Fabrication of Soda Lime Glass Foam from Industrial Waste Using Nano AlN. *Journal of Alloys and Compounds*. 747: 408–415.
- Fahlepy, M.R. 2022. Hukum Bragg - Defenisi, Persamaan, dan Penerapannya dalam XRD. <https://www.thinksphysics.com/2022/09/hukum-bragg-xrd-x-ray-diffraction.html>. Di akses pada tanggal 27 Mei 2023.
- Fernandes, H.R., Tulyaganov, D.U. and Ferreira, J.M.F. 2009. Production and Characterisation of Glass Ceramic Foams from Recycled Raw materials. *Advances in Applied Ceramics*. 108(1): 9–13.
- Fernandes, H.R., Gaddam A., Tulyaganov D.U. and Ferreira J.M.F. 2020. Design and Synthesis of Foam Gasses from Recycled Materials. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 17(1): 64-74.
- Fisli, A., Safitri, R. D., Nurhasni, N., dan Deswita, D. 2018. Analisis Struktur dan Porositas Komposit Fe_3O_4 -Karbon Aktif dari Limbah Kertas sebagai Adsorben Magnetik. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 19(4): 179–187.

- Francis, A.A., Rahman, M.K.A. and Daoud, A. 2013. Processing, Structures and Compressive Properties of Porous Glass-Ceramic Composite Prepared from Secondary By-Product Materials. *Ceramics International*. 39(6): 7089-7095.
- Fomichev, S.V., Dergacheva, N.P., Steblevskii, A.V. and Krenev, V.A. 2011. Production of Ceramic Materials by Sintering of Ground Basalt. *Theoretical of Chemical Engineering*. 45(4): 526-529.
- Guo, W., Hu, T., Qin, H., Gao, P. and Xiao, H. 2021. Preparation and in Situ Reduction of Ni/ SiC_xO_y Catalysts Supported on Porous SiC Ceramic for Ethanol Steam Reforming. *Ceramics International*. Vol. 47(10A): 13738-13744.
- Guo, Y., Zhang, Y., Huang, H., Meng, X., Liu, Y., T Shuchen., and Baoying Li. 2016. Novel Glass Ceramic Foams Materials Based on Polishing Porcelain Waste Using The Carbon Ash Waste as Foaming Agent. *Construction and Buildings Materials*. 125: 1093-1100.
- Han, L., Huang, L., Dong, L., Zhang, H., Pei, Y., Li, F., Jia, Q., and Zhang, S. 2020. Low-temperature Preparation of High-Performance Porous Ceramics Composed of Anorthite Platelets. *Journal of the American Ceramic Society*. 103(9): 5365-5373.
- Hasheminia, S., Nemati, A., Yekta, B.E., and Alizadeh, P. 2012. Preparation and Characterisation of Diopside-Based Glass-Ceramic Foams. *Ceramics International*. 38(3): 2005-2010.
- Hisham, N.A.N., Zaid, M.H.M., Aziz, S.H.A., and Muhammad, F.D. 2021. Comparison of Foam Glass-Ceramics with Different Composition Derived from Ark Clamshell (ACS) and Soda-Lime-Silica (SLS) Glass Bottles Sintered at Various Temperatures. *Materials*. 14(570):1-15.
- Hower, J.C., Henke, K.R., Dai, S., Ward, C.R., French, D., Liu, S. and Graham, U.M. 2017. *Generation and Nature of Coal Fly Ash and Bottom Ash. In Coal Combustion Products (CCP's)*. Wodhead Publishing.
- How, L.F., Islam, A., Jaafar, M.S., and Taufiq-Yap, Y.H. 2016. Extraction and Characterization of γ -Alumina from Waste Aluminium Dross. *Waste Biomass Valor*. 8: 321-327.
- Hu, S., Li, D., Li, Y., Guo, Q., Tian, D., Zhang, L., and Li, H. 2023. Preparation of Foamed Ceramics from Graphite Tailings Using A Self-Foaming Method. *Minerals*. 13(521): 1-14.
- Inkson, B.J. 2016. Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization. *Material Characterization Using Nondestructive Evaluation (NDE) Methods* : 17-43.
- Isnugroho, K., Hendronursito, Y. and Birawidha, D.C. 2018. Characterization and Utilization Potential of Basalt Rock from East - Lampung District. *IOP Conference Series: Material Science Engineering*. 285: 1-5.

- Jamaludin, A. dan Adiantoro, D. 2012. Analisis Kerusakan X-Ray Fluorescence (XRF). *Pengelolaan Instalasi Nuklir*. 9-10:19-28.
- Jamaluddin, K. 2010. X-RD (X-Ray Diffractions). *Makalah Fisika Material* ; 3-5.
- Jeong, T., Chu, H.K., Kim, S.J., Lee, J., Chae, K.J., and Hwang, M.H. 2019. Evaluation of Foam-glass Media in a High-Rate Filtration Process for The Removal of Particulate Matter Containing Phosphorus in Municipal Wastewater. *Journal of Environmental Management*. 239:159-166.
- Johri,S., Sunil, K., Jain, P., Gedam, P.C., Deshpande, J., and Hariieeshwar. 2018. Course Project Effects of Cold Extrusion on Material Properties.
- Keawthun, M., Krachodnok, S., and Chaisena, A. 2014. Conversion of Waste Glasses into Sodium Silicate Solutions. *International Journal of Chemical Sciences*. 12(1): 83-91.
- Kempen, E.V., Casas, M., Pershagen, G. and Foraster, M. 2018. WHO Environmental Noise Guidelines for The European Region: A Systematic Review on Environmental Noise and Cardiovascular and Metabolic Effects: A Summary. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 15(2): 1-59.
- Kiefer, E., Sigg, L., and Schsseler, P. 1997. *Improvements in Electron Microscopes*. Environmental. Sci. Rechnol. 6(11): 553-572.
- Kobayashi, Y., and Kato, E.1994. Low-Temperature Fabrication of Anorthite Ceramics. *Journal of The American Ceramic Society*. 77(3):833-834.
- König, J., Petersen, R.R. and Yue, Y. 2014. Influence of The Glass–Calcium Carbonate Mixture's Characteristics on The Foaming Process and The Properties of The Foam Glass. *Journal of European Ceramic Society*. 34(6):1591–1598.
- König, J., Petersen, R.R., and Yue, Y. 2014. Fabrication of Highly Insulating Foam Glass Made from CRT Panel Glass, *Ceramics International*. 41(8): 9793-9800.
- König, J., Lopez-Gil, A., Cimavilla-Roman, P., Rodriguez-Perez, M.A., Petersen, R.R., Østergaard, M.B., Iversen, N., Yue, Y. and Spreitzer, M. 2020. Synthesis and Properties of Open-and Closed-Porous Foamed Glass with A Low Density. *Construction and Building Materials*. 247(118574): pp. 1-10.
- Kyaw Oo D'Amore, G., Caniato, M., Travan, A., Turco, G., Marsich, L., Ferluga, A. and Schmid, C. 2017. Innovative Thermal and Acoustic Insulation Foam from Recycled Waste Glass Powder. *Journal of Cleaner Production*. 165: 1306–1315.
- Lamri, Y., Benzerga, R., Ayadi, A., Gendre, L.L. and El-Assal, A. 2020. Glass Foam Composites Based on Tire's Waste for Microwave Absorption Application. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 537(120017): 1-9.

- Le Bas, M. J. and Streckeisen, A. L. 1991. The IUGS Systematics of Igneous Rocks. *Journal of the Geological Society*. 148(5): 825–833.
- Lee, S.W., Obregón-Alfaro, S. and Rodríguez-González, V. 2011. Photocatalytic Coatings of Silver–TiO₂ Nanocomposites on Foamed Waste-Glass Prepared by Sonochemical Process. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*. 221(1): 71–76.
- Lebullenger, R., Chenu, S., Rocherullé, J., Merdrignac-Conanec, O., Cheviré, F., Tessier, F., Bouzaza, A. and Brosillon, S. 2010. Glass Foams for Environmental Applications. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 356(44–49): 2562–2568.
- Lee, S.M., VanderVeer, B.J., Hrma, P., Hilliard, Z.J., Heilman-Moore, J.S., Bonham, C.C., Pokorny, R., Dixon, D.R., Schweiger, M.J. and Kruger, A.A. 2016. Effects of Heating Rate, Quartz Particle Size, Viscosity, and Form of Glass Additives on High-Level Waste Melter Feed Volume Expansion. *Journal of The American Ceramic Society*. 100(2): 583–591.
- Li, X., Lv, D. and Chen, K. 2012. Effects of Graphite Additive on Dielectric Properties and Microwave Absorption Properties of Zinc-Containing Foam Glass. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 358(21): 2917–2921.
- Linder, A., Colchero, J., Apell, H.J., Marti, O., and Mlynek, J. 1992. A Field Emission Scanning Electron Microscopy. *ASTM Bull, Ultra microscopy*: 15-23.
- Liu, B., Yang, Q.W. and Zhang, S.G. 2019. Integrated Utilization of Municipal Solid Waste Incineration Fly Ash and Bottom Ash for Preparation of Foam Glass–Ceramics. *Rare Metals*. 38(10): 914–921.
- Liu, T., Lin, C., Liu, J., Han, L., Gui, H., Li, C., Zhou, X., Tang, H., Yang, Q. and Lu, A. 2018. Phase Evolution, Pore Morphology and Microstructure of Glass Ceramic Foams Derived from Tailings Wastes. *Ceramics International*. 44(12): 14393–14400.
- Liu, T., Zhang, J., Wu, J., Liu, J., Li, C., Ning, T., Luo, Z., Zhou, X., Yang, Q. and Lu, A. 2019. The Utilization of Electrical Insulators Waste and Red Mud for Fabrication of Partially Vitrified Ceramic Materials with High Porosity and High Strength. *Journal Of Cleaner Production*. 223: 790–800.
- Liu, W., Shao, Q., Ji, G., Liang, X., Cheng, Y., Quan, B. and Du, Y. 2017. Metal–Organic-Frame Works Derived Porous Carbon-Wrapped Ni Composites with Optimized Impedance Matching as Excellent Lightweight Electromagnetic Wave Absorber. *Chemical Engineering Journal*. 313: 734–744.
- Longo, A.A. 1984. *A Correlation for A Middle Keweenaw Flood Basalt: The Greenstone Flow, Isle Royale and Keweenaw Peninsula*. Michigan. M.S. Thesis, Michigan Technological University. Houghton. MI.

- Loya, M.I.M. and Rawani, A.M. 2014. A Review: Promising Applications for Utilization Fly Ash. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*. 2(7): 143-149.
- Lu, G., Feng, X., Li, Y., and Zhang, X. 2020. Influence of Microwave Treatment on Mechanical Behaviour of Compact Basalts Under Different Confining Pressures. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 12(2): 213-222.
- Mardiah, R., Alfian K., dan Monita O. 2018. Porositas Beton Blended Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Substitusi Semen Di Air Gambut. *Jurnal Online Mahasiswa FTEKNIK*.5:1-5.
- Mardina, D., Asmi D., Badaruddin, M., and Syahrial, A.Z. 2021. Preparation of Synthetic β -Wollastonite Produced from Amorphous SiO₂ Bamboo Leaf Ash and Meretix Meretix Shell. *Materials Science Forum*. 1029: 167-173.
- Marangoni, M., Secco, M., Parisatto, G., Artioli, E., Bernardo, P., Colombo, H., Altasi, M., Binmaged. and Binhussain, M. 2014. Cellular Glass–Ceramics from A self Foaming Mixture of Glass and Basalt Scoria, *Journal of Non-Crystalline Solids*. 403: 38–46.
- Masta, N. 2020. *Buku Materi Pembelajaran Scanning Electron Microscopy*. Universitas Kristen Indonesia, Jakarta.
- Meawad, A.S., Bojinova, D.Y. and Pelovski, Y.G. 2010. An Overview of Metals Recovery from Thermal Power Plant Solid Wastes. *Waste Management*. 30(12): 2548-2559.
- Mi, H., Yang, J., Su, Z., Wang, T., Li, Z., Huo, W. and Qu, Y. 2017. Preparation of Ultra-Light Ceramic Foams from Waste Glass and Fly Ash. *Advances In Applied Ceramics*. 116(7): 400–408.
- Mohd Noor,A.H., Ab Aziz, S., Abdul Rashid, S.S., Mohd Zaid, M.H., Alassan, Z.P., and Matori, K.A.2015. Synthesis and Characterization of Wollastonite Glass-Ceramics from Eggshell and Waste Glass. *Journal of Solid State Science and Technology Letters*. 16(1-2): 1-5.
- Mostafa, M. and Ali, A. 2018. Enhanced Alumina Recovery from Secondary Aluminum Dross for High Purity Nanostructured Alumina Powder Production: Kinetic Study. *Journal of Environmental Management*. 212: 278–291.
- Mulyaningsih, S. 2018. *Kristalografi & Mineralogi*. Edisi Pertama, Akprind Press. Yogyakarta.
- Oyedotun T.D. Timothy. 2018. X-ray Fluorescence (XRF) in The Investigation of The Composition of Earth Materials: A Review and an Overview. *Geology, Ecology, and Landscapes*. 2(2): 148-154.

- Owoeye, S.S., Matthew, G.O., Oviemhanda, F.O. and Tunmilayo, S.O. 2020. Preparation and Characterization of Foam Glass from Waste Container Glasses and Water Glass for Application in Thermal Insulations. *Ceramics International*. 46(8B): 1770-11775.
- Pabst, W. and Gregorová, E. 2014. Conductivity of Porous Materials with Spheroidal Pores. *Journal of European Ceramic Society*. 34(11): 2757–2766.
- Pandian, N.S. 2013. Fly Ash Characterization with Reference to Geotechnical Applications. *Journal of the Indian Institute of Science*. 84(6): 189-216.
- Paunescu L., Axinte, S.M., Dragoescu, M.F. and Cosmulescu, F. 2020. Glass-Ceramic Foams Made of Very High Coal Fly Ash Weight Ratio by The Direct Microwave Heating Technique. *Journal La Multiapp*. 1(04): 33-42.
- Pavlovic, M., Dojcinovic, M., Prokic-Cvetkovic, R., Andric, L., Ceganjac, Z., and Trumbulovic, L. 2019. Cavitation Wear of Basalt-Based Glass Ceramic. *Materials*. 12(1552):1-11.
- Pedroso, M., de Brito, J. and Silvestre, J.D. 2017. Characterization of Eco-Efficient Acoustic Insulation Materials (Traditional and Innovative). *Construction and Building Materials*. 140: 221–228.
- Petersen, R.R., König, J. and Yue, Y. 2015. The Mechanism of Foaming and Thermal Conductivity of Glasses Foamed with MnO₂. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 425: 74–82.
- Ponsot, I. and Bernardo, E. 2013. Self Glazed Glass Ceramic Foams from Metallurgical Slag and Recycled Glass. *Journal of Cleaner Production*. 59: 245-250.
- Puglia, M.K., 2021. X-ray Fluorescence in Material Analysis. <https://deringerney.com/x-ray-fluorescence-in-material-analysis> di akses 4 mei 2023.
- Qin, G.X., Hao, Y., Wang, S. and Dong, Y.B. 2020. Rapid Formation of Nitrogen-Doped Carbon Foams by Self-Foaming as Metal-Free Catalysts for Selective Oxidation of Aromatic Alkanes. *Applied Catalysis A: General*. 591(117400): 1-8.
- Rashid, R.A., Shamsudin, R., Hamid, M.A.A., and Jalar A. 2014. Low Temperature of Wollastonite from Limestone and Silica Sand Through Solid State Reaction. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 2: 77-81.
- Ram, L.C. and Mastro, R.E. 2014. Fly Ash for Soil Amelioration: A Review on The Influence of Ash Blending with Inorganic and Organic Amendments. *Earth-Science Reviews*. 128: 52-74.
- Richerson, D.W. 1992. *Modern Ceramic Engineering*. Marcel Dekkerine, Inc, New York.

- Ridha, M. dan Darminto. 2016. Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi menggunakan Metode Archimedes dan Software Image-J. *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*. 12(3): 124-130.
- Rincon, A., Desideri, D., and Bernardo, E. 2018. Functional Glass-Ceramic Foams from 'Inorganic Gel Casting' and Sintering of Glass/Slag Mixtures. *Journal of Cleaner Production*. 187: 250-256.
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., and Januarti J.E. 2017. Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. *MATEC Web of Conferences*. 01031:1-8.
- R. Phuttawong, N. Chantaramee, P. Pookmanee., and R. Puntharod. 2015. Synthesis and Characterization of Calcium Silicate from Rice Husk Ash and Shell of Snail *Pomacea Canaliculata* by Solid State Reaction. *Advanced Materials Research*. 1103: 1-7.
- Sahoo, P.K., Kim, K., Powell, M.A. and Equeenuddin, S.M. 2016. Recovery of Metals and Other Beneficial Products from Coal Fly Ash: A Sustainable Approach for Fly Ash Management. *International Journal of Coal Science & Technology*. 3(3): 267-283.
- Samtur, H. 1974. *Glass recycling and reuse*. University of Wisconsin, National Science Foundation.
- Saparuddin, D.I., Hisham, N.A.N., Aziz, S.A., Matori, K.A., Honda, S., Iwamoto, Y. and Zaid, M.H.M. 2020. Effect Of Sintering Temperature on The Crystal Growth, Microstructure and Mechanical Strength of Foam Glass-Ceramic from Waste Materials. *Journal of Materials Research and Technology*. 9 (3): 5640–5647.
- Sarker, M. S. R., Alam, M. Z., Qadir, M. R., Gafur, M. A. and Moniruzzaman, M. 2015. Extraction and Characterization of Alumina Nanopowders from Aluminium Dross by Acid Dissolution Process. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 22(4): 429–436.
- Sasmal, N., Garai, M. and Karmakar, B. 2015. Preparation and Characterization of Novel Foamed Porous Glass-Ceramics. *Materials Characterization*. 103: 90–100.
- Sassi, M., and Simon, A. 2022. Waste-to-Reuse Foam Glasses Produced from Soda-Lime-Silicate Glass, Cathode Ray Tube Glass, and Aluminium Dross. *Inorganic*. 10(1): 1-14.
- Scarinci, G., Brusatin, G. and Bernado, E. 2005. *Glass Foam. In Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- Schwertmann, U. 2008. *Iron Oxides*. In: Chesworth W. Encyclopedia of Soil Science, Springer, Netherland. 363-369.

- Sedláčik, M., Nguyen, M., Opravil, T. and Sokolář, R. 2022. Preparation and Characterization of Glass-Ceramic Foam from Clay-Rich Waste Diatomaceous Earth. *Materials*. 15(4): 1-13.
- Shi, H., Feng, K., Wang, H., Chen, C. and Zhou, H. 2016. Influence of Aluminium Nitride as a Foaming Agent on The Preparation of Foam. *International Journal Minerals, Metallurgy and Materials*. 23: 595-600.
- Siddique, R. 2008. *Waste Materials and By-Products in Concrete. Waste Glass*. Chapter 5. Springer, Berlin, Heidelberg.
- Sihombing A.J., Ahmad Fadli., dan Bahrudin. 2016. Pembuatan Foam Glass Menggunakan Limbah Pecahan Kaca dan Abu Terbang (Fly ash) dari Pabrik Sawit, *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*. 3(1): 1-7.
- Silva, R.V., de Brito, J., Lye, C.Q. and Dhir, R.K. 2017. The Role of Glass Waste in The Production of Ceramic-Based Products and Other Applications: A Review. *Journal of Cleaner Production*. 167: 346–364.
- Song, C., Yin, X., Han, M., Li, X., Hou, Z., Zhang, L. and Cheng, L. 2017. Three-Dimensional Reduced Graphene Oxide Foam Modified with ZnO Nanowires for Enhanced Microwave Absorption Properties. *Carbon*. 116: 50–58.
- Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., Oliveira K.G., Teixeira A.H.B. and Oliveira A.P.N. 2017. Glass Foams Produced from Glass Bottles and Eggshell Wastes. *Process Safety Environmental Protection*. 111: 60–64.
- Strzałkowska, E. 2021. Morphology and Chemical Composition of Mineral Matter Present in Fly Ashes of Bituminous Coal and Lignite. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 18: 2533-2544.
- Studioliterasi, M. 2022. Hukum Archimedes. https://studioliterasi.com/hukum-archimedes/#google_vignette diakses pada tanggal 27 Mei 2023.
- Sulardjaka., Rahman, M.S., Wahyudianto, C. 2013. Pengaruh Waktu dan Temperatur Sinter Terhadap Densitas Dan Porositas Komposit Aluminium yang Diperkuat Limbah Geothermal. *Rotasi*.15(4): 28-32.
- Sun, Q. and Wang, H. 2017. Effects of Na₂B₄O₇.5H₂O on Foam Glass-Ceramics Prepared from High Titanium Blast Furnace Slag. *Advanced in Engineering. Research*. 146: 6–8.
- Sun, Y., Shi, J., Zhu, F., Tan, X., Li, W., Wang, Y., Zhao, R., Xu, S., Zhang, P., Wei, C. and Miao, S. 2018. Preparation Of Nepheline-Based Ceramic Foams from Basalt Tailing and Black Cotton Soil. *Waste Biomass Valori*. 11(5): 2331–2343.
- Swanson, D.A., Wright, T.L. and Helz, R.T. 1975. Linear Vent Systems and Estimated Rates of Magma Production and Eruption for The Yakima Basalt on The Columbia Plateau. *American Journal of Science*. 275: 877 - 905.

- Sylvia, N. dan Mahmudah, N.L. 2018. Tinjauan Proses dan Teknik Flameworking Pada Limbah Kaca. *NARADA. Jurnal Desain & Seni*. 5(2): 27-36.
- Theam, Y., Ee, L., Mohd, F. and Shahabaldin, R. 2018. Optimization of Aluminium Recovery from Water Treatment Sludge Using Response Surface Methodology. *Journal of Environmental Management*. 228: 13–19.
- Tsakiridis, P. 2012. Aluminium Salt Slag Characterization and Utilization-A Review, *Journal of Hazardous Materials*. 217–218: 1–10.
- Tsakiridis, P.E., Oustadakis, P., and Leonardou, A.S. 2013. Aluminium Recovery During Black Dross Hydrothermal Treatment. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 1: 23-32.
- Tulyaganov, D.U., Fernandes, H.R., Agathopoulos, S. and Ferreira, J.M.F. 2006. Preparation and Characterization of High Compressive Strength Foams from Sheet Glass, *Journal Porous Materials*. 13: 133-139.
- Uribe, L., Giraldo, J.D. and Vargas, A. 2020. Effect Of the Operational Conditions in The Characteristics of Ceramic Foams Obtained from Quartz and Sodium Silicate. *Materials*. 13(1806): 1-15.
- Wahyuni, M., dan Aini, S. 2021. Sintesis Zat Warna Prussian Blue ($\text{Fe}_4[\text{Fe}(\text{CN})_6]_3$) Berbahan Pasir Besi Alam. *Periodic Chemistry Journal of Universitas Negeri Padang*, 10(1), 73–76.
- Wang, H., Chen, Z., Ji, R., Liu, L. and Wang, X. 2018. Integrated Utilization of High Alumina Fly Ash for Synthesis of Foam Glass Ceramic. *Ceramics International*. 44(12):13681–13688.
- Wu, J.P., Boccaccini, A.R., Lee, P.D., Kershaw, M.J., and Rawlings, R.D. 2006. Glass Ceramic Foams from Coal Ash and Waste Glass: Production and Characterization. *Advances in Applied Ceramics*. 105(1): 32-39.
- Yan, Z., Feng, K., Tian, J., and Liu, Y. 2019. Effect of High Titanium Blast Furnace Slag on Preparing Foam Glass–Ceramics for Sound Absorption. *Journal of Porous Material*. 26:1209–1215.
- Yaping, Y., Xiaoqiang, Z., Weilan, Q., Mingwen, W. 2008. Synthesis of Pure Zeolites from Supersaturated Silicon and Aluminum Alkali Extracts from Fused Coal Fly Ash. *Fuel*. 87: 1880-1886.
- Ye Li, Cheng, X., Gong, L., Feng, J., Cao, W., Zhang, R., and Zhang, H. 2015. Fabrication and Characterization of Anorthite Foam Ceramics Having Low Thermal Conductivity. *Journal of the European Ceramic Society*. 35: 267-275.
- Yilmaz, S., Bayrak, G., Sen, S., and Sen, U. 2006. Structural Characterization of Basalt-Based Glass–Ceramic Coatings. *Materials & Design*. 27: 1092–1096.

- Yoesepha, W., Helwani, Z., dan Saputra, E. 2016. Produksi Biodiesel dari Minyak Sawit Off Grade Menggunakan Katalis $\text{Na}_2\text{O}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ Pada Tahap Transesterifikasi. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*. 3(2):1–8.
- Yunita, E., Rahmaniah, R., dan Fitriyanti, F. 2017. Analisis Potensi dan Karakteristik Limbah Padat Fly Ash dan Bottom Ash Hasil dari Pembakaran Batubara pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) PT. Semen Tonasa. *Jurnal Fisika Dan Terapannya*. 4(1): 93-106.
- Zaiou, S., Harabi, A., Harabi, E., Guechi, A., Karboua, N., Benhassine, M.T., Zouai, S., and Guerfa, F. 2016. Sintering of Anorthite Based Ceramics Prepared From Kaolin DD2 and Calcite. *Ceramica*. 62:317-322.
- Zhang, J., Liu, B., Zhao, S., Shen, H., Liu, J. and Zhang, S. 2020. Preparation and Characterization of Glass Ceramic Foams Based on Municipal Solid Waste Incineration Ashes Using Secondary Aluminium Ash as Foaming Agent. *Construction and Building Materials*. 262(120781): 1-10.
- Zhang, Y., Liu, L., Van der Bruggen, B., Leung, M.K.H. and Yang, F. 2019. A Free-Standing 3D Nano-Composite Photo-Electrode—Ag/ZnO Nanorods Arrays on Ni Foam Effectively Degrade Berberine. *Chemical Engineering Journal*. 373: 179-191.
- Zhu, M., Ru Ji., Li Z., Wang, H., Liu, L., and Zhang, Z. 2016. Preparation of Glass Ceramic Foams for Thermal Insulation Applications From Coal Fly Ash and Waste Glass. *Construction and Buildings Materials*. 112: 398-405.
- Zong, Y., Zhao, C., Chen, W., Liu, Z., and Cang, D. 2020. Preparation of Hydro-Sodalite from Fly Ash Using a Hydrothermal Method with a Submolten Salt System and Study of The Phase Transition Process. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 27(1): 55-62.
- Zongwen, L., Jianxun, M., Hongmin, Ma., and Xin, X. 2018. Properties and Applications of Basalt Fiber and Its Composites. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 186: 1-7.
- Zulkarnain, I. 2011. Geochemical Evidence of Island-Arc Origin for Sumatra Island; A New Perspective Based on Volcanic Rocks in Lampung Province, Indonesia. *Jurnal Geologi Indonesia*. 6 (4): 213-225.