

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BASALT TERHADAP
PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* MELALUI METODE
*DIRECT FOAMING***

(Skripsi)

Oleh

**NUR ANNISA
1917041039**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI *BASALT* TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* MELALUI METODE *DIRECT FOAMING*

Oleh

NUR ANNISA

Dalam era konstruksi modern, kebutuhan akan gedung tinggi sebagai solusi efisien lahan perkotaan semakin mendesak. Oleh karena itu diperlukan solusi inovatif dengan menggunakan material ringan, seperti *cellular glass ceramic*, untuk mengatasi beban struktural tinggi, meningkatkan efisiensi energi, dan menyederhanakan proses konstruksi pada gedung tinggi. Penelitian ini menggunakan metode *direct foaming* dengan variasi bahan *polyurethane* (PU) sebesar 30%, 40%, dan 50% sebagai bahan pembusa. Batu *basalt* berasal dari Mataram Baru, Lampung Timur. Sedangkan *fly ash* berasal dari PLN Tarahan, Lampung Selatan. Sampel dilakukan variasi komposisi 50:50%, 60:40%, 70:30%, 80:20%, dan 90:10%. Proses dilakukan dengan pemanasan pada suhu 400°C, 700°C, dan 950°C selama 2 jam, dengan pendinginan di dalam tungku. Hasil karakterisasi dan uji mekanis serta fisis menunjukkan bahwa *cellular glass ceramic* yang dibuat dengan bahan *basalt* dan *fly ash* dengan *polyurethane foam* sebagai *foaming agent* memberikan hasil yang didominasi oleh SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ dan CaO dengan fase kristal tertinggi yaitu *anorthite*, *albite*, dan *nepheline*. Dalam konteks kuat tekan, sampel yang didominasi oleh *basalt* menunjukkan kuat tekan yang semakin besar. Hasil karakterisasi SEM pada sampel 50B7F3 menunjukkan jumlah pori tertinggi dengan ukuran ≤ 1 mm sekitar 80% dan ≥ 1 mm sekitar 20%.

Kata kunci: *cellular glass ceramic, basalt, fly ash, foaming agent, polyurethane.*

ABSTRACT

THE EFFECT OF BASALT COMPOSITION VARIATIONS ON THE FORMATION OF CELLULAR GLASS CERAMIC THROUGH THE DIRECT FOAMING METHOD

By

NUR ANNISA

In the modern construction era, the need for tall buildings as an efficient solution for urban land is increasingly urgent. Therefore, innovative solutions are needed using lightweight materials, such as cellular glass ceramic, to overcome high structural loads, increase energy efficiency, and simplify the construction process in tall buildings.. This research uses the direct foaming method with variations in polyurethane (PU) material of 30%, 40% and 50% as the foaming agent. Basalt stone comes from Mataram Baru, East Lampung. Meanwhile, fly ash comes from PLN Tarahan, South Lampung. Samples had composition variations of 50:50%, 60:40%, 70:30%, 80:20%, and 90:10%. The process is carried out by heating at temperatures of 400°C, 700°C, and 950°C for 2 hours, with cooling in the furnace. The results of characterization and mechanical and physical tests show that cellular glass ceramic made from basalt and fly ash with polyurethane foam as a foaming agent gives results that are dominated by SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ and CaO with the highest crystal phases, namely anorthite, albite and nepheline. In the context of compressive strength, samples dominated by basalt show greater compressive strength. The SEM characterization results on sample 50B7F3 show the highest number of pores with a size of ≤ 1 mm around 80% and ≥ 1 mm around 20%.

Keywords: cellular glass ceramic, basalt, fly ash , foaming agent, polyurethane.

***PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BASALT TERHADAP
PEMBENTUKAN CELLULAR GLASS CERAMIC MELALUI METODE
DIRECT FOAMING***

Oleh

NUR ANNISA

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

**Jurusan Fisika
Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian : **Pengaruh Variasi Komposisi *Basalt* Terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Melalui Metode *Direct Foaming***

Nama Mahasiswa : Nur Annisa

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041039

Jurusan : Fisika

Bidang Keahlian : Material

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



1. Komisi Pembimbing

Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.
NIP.196107231986031003

David Candra Birawidha, S.T., M.Si.
NIP.198403192008011006

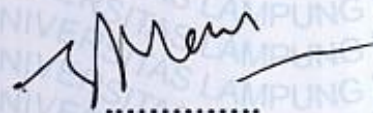
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

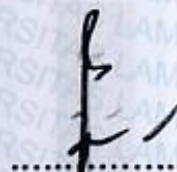
MENGESAHKAN

1. Tim penguji

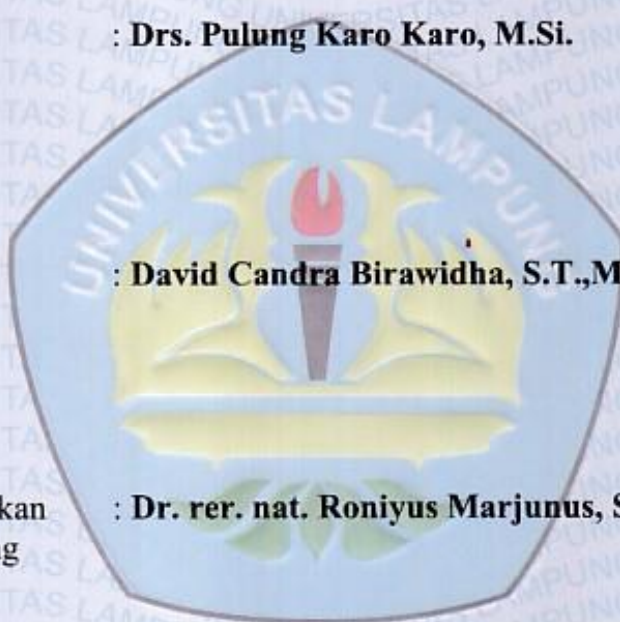
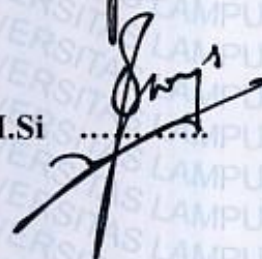
Ketua : Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.



Sekretaris : David Candra Birawidha, S.T.,M.Si.



Penguji Bukan Pembimbing : Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, S. Si., M.Si



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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



Tanggal Lulus Skripsi : 15 Januari 2024

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri. Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.



, 17 Januari 2024

Nur Annisa

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Nur Annisa, dilahirkan di Kota Agung, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung pada tanggal 23 Agustus 2001. Penulis merupakan anak kedua dari pasangan Bapak Alm. Ristarman dan Ibu Sam'atin. Penulis menyelesaikan pendidikan SDN 2 Kuripan pada tahun 2013, MtsN 1 Kotaagung pada tahun 2016, dan SMAN 1 Kotaagung pada tahun 2019. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur penerimaan SBMPTN. Selama menempuh pendidikan, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT. Sucofindo dengan judul “Pengujian *Non Destructive Test (NDT)* Terhadap *Shackle Overhead Travelling Crane* Menggunakan Metode *Magnetic Particle Inspection (MPI) Wet Visible*”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2022 di Kecamatan Talang Padang, Kelurahan Kejayaan, Tanggamus. Dalam bidang organisasi penulis sebagai Anggota Danus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) FMIPA Universitas Lampung periode 2020-2022.

MOTTO

“Boleh jadi kamu tidak menyenangi sesuatu,
padahal itu baik bagimu, dan boleh jadi kamu
menyukai sesuatu, padahal itu tidak baik bagimu.

Allah mengetahui, sedang kamu tidak
mengetahui”

-QS: Al-Baqarah : 216-

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai
dengan kesanggupannya”

-QS: Al-Baqarah : 286-

“Hiduplah dengan penuh harapan, karena setiap
misteri dalam kehidupan membuatnya semakin
berharga”

-Nur Annisa-

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah
Subhanahu WaTa'ala, karya ini
dipersembahkan kepada:

Kedua orangtua ku

Alm. Ristarman dan Ibu Sam'atin

Kedua saudari ku

Nur Fatimah dan Nur Haliza

“Terimakasih untuk segala do’a dan usaha yang selalu
diberikan demi keberhasilanku yang selalu memberikan
semangat dalam menyelesaikan skripsi ini”

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT, yang telah memberikan kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Variasi Komposisi *Basalt* Terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Melalui Metode *Direct Foaming*” yang merupakan syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih terdapat kekurangan secara isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca umumnya. Aamiin ya Rabbal Alamin.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Nur Annisa

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Komposisi Basalt Terhadap Pembentukan Cellular Glass Ceramic Melalui Metode Direct Foaming”**

Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Pulung Karo-karo, M.Si. sebagai pembimbing akademik dan pembimbing utama yang telah memberi arahan, mengajari, membimbing, dan memberi pemahaman terhadap penulis.
2. Bapak David Candra Birawidha S.T., M.Si. sebagai pembimbing kedua yang telah membantu, membimbing, memberi pemahaman dan dukungan terhadap penulis.
3. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus M.S., M.Si. sebagai dosen penguji yang telah mengoreksi kekurangan, dan memberikan saran serta memberi masukan dalam penyelesaian skripsi ini.

4. Bapak Gurum Ahmad Fauzi, S.Si., M.T. sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
5. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai Sekretaris Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Kedua orang tuaku Bapak Alm. Ristarman dan Ibu Sam'atin dan saudara kandungku Nur Fatimah dan Nur Haliza yang selalu memberikan cinta kasih, dukungan, pengorbanan dan do'a untuk penulis.
7. Teman-temanku Windi, Vivi, Mela, Ve, Hilya, Faisal dan Bg man yang telah menjadi rekan diskusi selama proses pengerjaan skripsi ini.

Bandar Lampung, 17 Januari 2024

Nur Annisa

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
HALAMAN JUDUL	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
MENGESAHKAN	vi
PERNYATAAN	vii
RIWAYAT HIDUP	viii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Cellular Glass Ceramic</i>	7
2.2 <i>Basalt Skoria</i>	8
2.3 <i>Fly Ash</i>	8

2.4 Struktur Mineral <i>Basalt</i>	9
2.5 Struktur Mineral <i>Fly Ash</i>	11
2.6 <i>Polyurethane</i>	11
2.7 Binder.....	12
2.8 Metode <i>Direct Foaming</i>	14
2.9 Pengujian Dan Karakterisasi	14
2.9.1 Porositas	14
2.9.2 Kuat Tekan.....	15
2.9.3 Massa Jenis	15
2.9.4 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	16
2.9.5 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	18
2.9.6 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	20

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.3 Prosedur Penelitian.....	21
3.3.1 Preparasi Bahan.....	23
3.3.2 Pembuatan Sampel	23
3.3.3 Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis Sampel	24
3.3.4 Karakterisasi	25
3.4 Diagram Alir Penelitian	26

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Karakterisasi Bahan	28
4.1.1 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence (XRF) Basalt dan Fly Ash</i>	28
4.1.2 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction (XRD) Basalt dan Fly Ash</i>	29
4.2 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i>	31
4.2.1 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence (XRF) pada Cellular Glass Ceramic</i>	31
4.2.2 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction (XRD) pada Cellular Glass Ceramic</i>	36

4.2.3 Hasil Karakterisasi Morfologi Permukaan Secara Makro pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	40
4.2.4 Hasil Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM) pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	44
4.3 Hasil Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis <i>Cellular Glass Ceramic</i>	50
4.3.1 Hasil Pengujian Massa Jenis pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	50
4.3.2 Hasil Pengujian Porositas pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	51
4.3.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	52
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	55
5.2 Saran	56

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Cellular glass ceramic</i>	7
Gambar 2.2 Batu <i>basalt</i> skoria.....	8
Gambar 2.3 <i>Fly ash</i>	9
Gambar 2.4 Natrium hidroksida.....	13
Gambar 2.5 Natrium silikat.....	13
Gambar 2.6 Kerja alat <i>X-Ray Diffraction</i>	17
Gambar 2.7 Difraksi sinar-X oleh sebuah Kristal.....	17
Gambar 2.8 Kerja alat <i>X-Ray Fluorescence</i>	20
Gambar 2.9 Kerja alat SEM	21
Gambar 3.1 Diagram perlakuan panas	24
Gambar 3.2 Diagram alir percobaan	27
Gambar 4.1 Difaktogram <i>basalt</i> dan <i>fly ash</i>	29
Gambar 4.2 Kadar senyawa SiO_2	32
Gambar 4.3 Kadar senyawa Al_2O_3	32
Gambar 4.4 Kadar senyawa Fe_2O_3	33
Gambar 4.5 Kadar senyawa CaO	33
Gambar 4.6 Kadar senyawa MgO	34
Gambar 4.7 Kadar senyawa Na_2O	34
Gambar 4.8 Difaktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 30%	36
Gambar 4.9 Difaktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 40%	38
Gambar 4.10 Difaktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 50%	39
Gambar 4.11 Sampel <i>cellular glass ceramic</i> PU 30% : (a) kode 30B5F5 (b) kode 30B6F4 (c) kode 30B7F3 (d) kode 30B8F2 (e) kode 30B9F1	41

Gambar 4.12 Sampel <i>cellular glass ceramic</i> PU 40% : (a) kode 40B5F5 (b) kode 40B6F4 (c) kode 40B7F3 (d) kode 40B8F2 (e) kode 40B9F1	42
Gambar 4.13 Sampel <i>cellular glass ceramic</i> PU 50% : (a) kode 50B5F5 (b) kode 50B6F4 (c) kode 50B7F3 (d) kode 50B8F2 (e) kode 50B9F1	43
Gambar 4.14 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 30%): (a) kode 30B6F4, (b) kode 30B9F1	45
Gambar 4.15 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 40%): (a) kode 40B5F5 (b) kode 40B9F1	46
Gambar 4.16 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 50%): (a) kode 50B5F5, (b) kode 50B7F3, dan 50B8F2	48
Gambar 4.17 Hubungan variasi komposisi bahan dan PU terhadap densitas	50
Gambar 4.18 Hubungan variasi komposisi bahan dan PU terhadap porositas	51
Gambar 4.19 Hubungan variasi komposisi bahan dan PU terhadap kuat tekan	52

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Proses pembuatan sampel	23
Tabel 4.1 Hasil karakterisasi XRF <i>basalt</i> dan <i>fly ash</i>	28
Tabel 4.2 Fase XRD <i>basalt</i>	30
Tabel 4.3 Fase XRD <i>fly ash</i>	30
Table 4.4 Fase XRD PU 30%	37
Tabel 4.5 Jumlah kristalin fase XRD PU 30%	37
Table 4.6 Fase XRD PU 40%	38
Tabel 4.7 Jumlah kristalin fase XRD PU 40%	38
Table 4.8 Fase XRD PU 50%	39
Tabel 4.9 Jumlah kristalin fase XRD PU 50%	39

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era perkembangan konstruksi yang pesat, pembangunan gedung tinggi menjadi suatu kebutuhan dalam mengoptimalkan penggunaan lahan perkotaan. Gedung tinggi tidak hanya menawarkan solusi efisien dalam pemanfaatan ruang, tetapi juga menimbulkan tantangan yang kompleks, terutama terkait dengan pemilihan material konstruksi. Gedung tinggi menghadapi tekanan besar dari beban struktural, baik dari aspek vertikal maupun lateral. Permasalahan yang muncul adalah keterbatasan material konvensional seperti beton atau baja yang umumnya cenderung berat. Penggunaan material konvensional pada gedung tinggi mengakibatkan beban struktural yang tinggi, mempengaruhi efisiensi energi, dan mempengaruhi pada proses konstruksi secara keseluruhan. Sehingga diperlukan solusi inovatif yang dapat menjawab permasalahan ini yaitu pemanfaatan material ringan.

Material ringan berkaitan dengan material berpori karena dalam material berpori terdiri dari dua bagian penyusun yaitu bagian padat dan bagian rongga yang diisi oleh fase gas. Salah satu penyebab adanya struktur rongga pada material ringan berpori ini karena adanya peran dari penambahan *foaming agent* yang berfungsi menghasilkan busa dan membentuk pori sehingga membuat suatu material menjadi ringan yang disebut *cellular glass ceramic* (Rajiman dan Listari,2019).

Cellular glass ceramic memiliki karakteristik ringan namun memiliki kekuatan tinggi, ketahanan kimia yang tinggi dan isolasi termal yang tinggi. Oleh karena sifat strukturalnya yang sangat baik, sangat cocok untuk digunakan sebagai insulasi di atap dan dinding (Liu *et al.*, 2018). *Cellular glass ceramic* juga memiliki sifat tidak mudah terbakar dan tahan air (Ostergaard, 2020). Dengan adanya teknologi *cellular glass ceramic* yang memiliki banyak kelebihan menjadikan *cellular glass ceramic* sebagai material yang sering digunakan dibandingkan material lain misalnya polimer yang mudah terbakar, masa pemakaian pendek, dan toksisitas lingkungan (Huo *et al.*, 2017).

Berdasarkan beberapa keunggulan yang dimiliki oleh *cellular glass ceramic*, perlu untuk mempertimbangkan bahan alternatif yang berpotensi untuk dijadikan material ringan. Batu *basalt* di anggap sebagai pilihan yang memadai sebagai mineral non logam, mudah ditemukan, tidak memerlukan biaya besar, dan dapat diolah menggunakan teknologi yang sederhana.

Batu *basalt* adalah batuan beku yang terbentuk dari lava yang mengalami pendinginan cepat di permukaan bumi. *Basalt* memiliki kandungan yang didominasi silika yang merupakan komponen utama kaca dan bahan keramik. Sehingga dapat diaplikasikan dalam pembuatan *cellular glass ceramic* (Amin dan Suharto, 2017). *Cellular glass ceramic* berbasis *basalt* yang mengandung unsur-unsur silika yang apabila mengalami proses sintering akan terjadi pelelehan dan memperkecil pori-pori akibat adanya unsur belerang dan gas oksigen sehingga terjadi perubahan struktur mikro seperti jarum-jarum kecil berbentuk foam (Amin dan Suharto, 2017).

Di Provinsi Lampung *basalt* memiliki potensi tinggi terhadap batu *basalt* dengan sejumlah cadangan sebesar 336.510.000 ton yang tersebar di berbagai Kabupaten (Widojoko dan Rajiman, 2011). Oleh karena jumlah cadangan yang besar akan *basalt* dan potensi batuan *basalt* yang belum dimanfaatkan secara maksimal sehingga, penelitian terus dilakukan untuk menggali lebih jauh potensi penggunaan *basalt* dalam pengembangan material *cellular glass ceramic*.

Beberapa penelitian sedang dilakukan dalam pengembangan *cellular glass ceramic*, salah satunya melibatkan studi yang dilakukan oleh Marangani *et al* (2014). Penelitian ini mengeksplorasi penggunaan *lime glass* sebagai bahan dasar untuk menciptakan gelembung dalam proses pembuatan busa. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan unsur karbonat pada *lime glass* dapat merangsang pembentukan gelembung pada suhu tinggi. Meskipun demikian, struktur busa yang dihasilkan cenderung kurang stabil selama proses pembentukan.

Peneliti lainnya yang telah dilakukan oleh Kim *et al* (2020) dengan penggunaan serat *basalt* untuk menghasilkan *cellular glass ceramic* dengan kekuatan mekanik yang baik. Analisis struktur mikro menunjukkan bahwa sampel menunjukkan adanya kelompok serat *basalt* padat dengan distribusi pori yang merata pada 13% berat serat *basalt*, sedangkan pori tidak beraturan terbentuk dengan penambahan serat *basalt* yang lebih banyak.

Sejalan dengan itu, sejumlah peneliti telah memanfaatkan limbah sebagai campuran dalam bahan bangunan. Salah satunya yaitu limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara di pembangkit listrik berupa *fly ash*. adanya unsur material

pada *fly ash* yang mengalami oksidasi dan tidak terbakar secara sempurna akan melepas gas yang berfungsi untuk membantu peningkatan struktur pori yang ditandai dengan adanya LOI yaitu 10,49 % (Olivia *et al.*, 2015). *Fly ash* yang digunakan berasal dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) Tarahan.

Adapun metode yang digunakan dalam pembuatan *cellular glass ceramic* yaitu metode *direct foaming*. Metode ini adalah metode yang paling rasional dalam pembentukan *cellular glass ceramic* karena merupakan metode yang nyaman dan sederhana, Metode ini bergantung pada penggunaan surfaktan untuk menstabilkan busa yang dihasilkan oleh gelembung gas melalui suspensi, metode *direct foaming* menghasilkan bahan berpori dengan memasukkan udara ke dalam suspensi atau media cair (Petersen *et al.*, 2017). Penggunaan surfaktan dapat bertindak sebagai bahan pembusa, bahan pembusa yang digunakan dalam penelitian ini dengan pendekatan baru adalah *polyurethane foam*.

Karena keunggulan dari *basalt* dan ketersediaannya yang melimpah sehingga dilakukan penelitian “Pengaruh Variasi Komposisi *Basalt* Terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Melalui Metode *Direct Foaming*” dengan harapan memenuhi standar *cellular glass ceramic* komersial dengan standar nilai densitas berkisar antara 0.1–0.3g/cm³, porositas 85–95%, dan kuat tekan 0.4–6 MPa.

Pada penelitian ini dilakukan pembentukan *cellular glass ceramic* dengan variasi komposisi berbasis *basalt* dan *fly ash* melalui metode *direct foaming*. Karakterisasi yang dilakukan yaitu *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur fase yang terbentuk, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui struktur

mikro dari permukaan *cellular glass ceramic*. Sedangkan uji fisis pada penelitian ini antara lain uji kuat tekan (kemampuan *cellular glass ceramic* untuk menahan tekanan), uji densitas (pengukuran massa setiap satuan volume benda), dan uji porositas (persentase dari ruang kosong terhadap volume *cellular glass ceramic*).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, rumusan masalah yang akan diselesaikan dalam penelitian ini adalah untuk mengetahui bagaimana pengaruh variasi komposisi *basalt* dan struktur morfologi yang terbentuk terhadap sifat fisis dan sifat mekanis pada pembentukan *cellular glass ceramic*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang ingin dicapai pada penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi *basalt* dan struktur morfologi yang terbentuk terhadap sifat fisis dan sifat mekanis pada pembentukan *cellular glass ceramic*.

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah yang dibahas dalam penelitian ini adalah :

1. *Basalt* yang digunakan berasal dari Labuhan Maringgai, Lampung Timur.
2. *Fly ash* yang digunakan berasal dari Perusahaan Listrik Negara (PLN) Tarahan.
3. Karakterisasi yang digunakan XRD, XRF, dan SEM serta uji mekanis dan fisis meliputi kuat tekan, porositas, dan densitas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi *basalt* dan struktur morfologi yang terbentuk terhadap sifat fisis dan sifat mekanis pembentukan *cellular glass ceramic* berbasis *basalt* melalui metode *direct foaming*.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Cellular Glass Ceramic*

Cellular glass ceramic adalah sistem heterofase yang terdiri atas fasa padat yang merupakan kaca membentuk dinding tipis sel tunggal setebal beberapa mikrometer dan fasa gas yang mengisi sel sel tersebut. *Cellular glass ceramic* mempunyai kelebihan yaitu kekuatan mekanik yang tinggi dan masa penggunaan yang lama (Niu *et al.*, 2020). *Cellular glass ceramic* yang sebagai bahan berpori yang memiliki sifat isolasi termal dan mencapai tingkat porositas mencapai 90% (Saparuddin *et al.*, 2020). Dilihat dari struktur selnya, *cellular glass ceramic* terbagi atas 2 jenis yakni sel tertutup (*closed cell*) merupakan struktur jenis foam yang mempunyai kuat tekan dan stabilitas dimensi lebih tinggi serta serapan air yang rendah, berfungsi untuk bahan bangunan, sedangkan sel terbuka (*open cell*) mengandung pori-pori yang saling terkoneksi satu sama lain sehingga memperlihatkan kinerja penyerapan air yang baik (Sunarya, 2013).



Gambar 2.1 *Cellular glass ceramic*.

2.2 *Basalt Skoria*

Batu *basalt* skoria merupakan batuan yang terbentuk akibat letusan gunung berapi yang mengeluarkan lava ketika mencapai permukaan bumi, lalu lava ini mendingin dengan cepat dan beberapa minggu setelahnya terbentuklah batu *basalt* skoria (ESDM, 2015). *Basalt* skoria sendiri memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan jenis *basalt* lainnya. Secara visual, batuan *basalt* memiliki morfologi spon pada permukaannya sehingga mudah dibedakan dengan batuan lainnya (Birawidha *et al.*, 2020).



Gambar 2.2 Batu *basalt scoria*.

Batuan ini sebagian besar struktur rongga nya tidak beraturan. Struktur tersebut diakibatkan oleh lava yang mengandung gas-gas saat lava membeku (Lolong dan Wibowo, 2016). Adapun kandungan pada material *basalt* skoria yang berasal dari Labuhan Maringgai Lampung Timur adalah mengandung SiO_2 sebesar 55,10 %, Al_2O_3 sebesar 17,95 % dan Fe_2O_3 sebesar 5,61% serta senyawa kimia lainnya (Widojoko dan Rajiman, 2011).

2.3 *Fly Ash*

Fly ash atau abu terbang merupakan abu dengan massa jenis yang ringan dan merupakan limbah pada hasil sisa pembakaran batu bara, karena massa jenis nya

yang ringan sehingga *fly ash* terbawa bersama gas buang pada tungku pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Di dunia perindustrian material, *fly ash* sering digunakan karena dengan penambahan komposisi material ini mengakibatkan penggunaan semen berkurang, harga yang murah serta ramah lingkungan (Diana dan fansuri, 2020). Secara umum, komponen *fly ash* biasanya meliputi SiO_2 , Al_2O_3 , CaO dan Fe_2O_3 (Ahmaruzzaman, 2010).

Saat ini, *fly ash* telah digunakan sebagai sumber alternatif untuk membuat geopolimer, pengikat atau semen baru yang sebanding dengan semen dalam penampilan, reaktivitas dan sifat (Palomo *et al.*, 1999). Berbeda dengan semen, kemampuan mengikat pada *fly ash* diaktifkan dengan cara oksida silika yang terkandung didalamnya direaksikan secara kimiawi dengan aktivator alkali dan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat (Djiwanto, 2001).



Gambar 2.3 *Fly ash*.

2.4 Struktur Mineral Basalt

2.4.1 Olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

Olivine merupakan kelompok mineral silikat yang tersusun dari unsur besi (Fe), Silikon (Si) dan magnesium (Mg). Mineral ini terbentuk pada suhu yang tinggi.

Mineral ini biasanya ditemui pada batuan *basalt* dan *ultramafic*. Memiliki bentuk kristal *orthorombic* dengan dimensi sel $a = 4,78 \text{ \AA}$, $b = 10,25 \text{ \AA}$, $c = 6,3 \text{ \AA}$.

2.4.2 *Anorthite* ($\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$)

Anorthite merupakan kelompok pertama yang terbentuk pada suhu tinggi dan berada pada batuan beku *basalt*. Mineral *anorthite* terdiri dari unsur kalsium (Ca), Aluminium (Al), dan Silikon (Si). Memiliki bentuk kristal *anorthic* dengan dimensi sel $a = 8,177 \text{ \AA}$, $b = 12,877 \text{ \AA}$, $c = 14,169 \text{ \AA}$.

2.4.3 *Pyroxene* ($\text{XY}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$)

Pyroxene merupakan kelompok mineral inosilikat. *Pyroxene* terdiri dari unsur kalsium (Ca), Aluminium (Al), Silikon (Si), Besi (Fe), dan Magnesium (Mg). Memiliki bentuk kristal *orthorombic*, dengan dimensi sel $a = 9,69 \text{ \AA}$, $b = 8,84 \text{ \AA}$, $c = 5,27 \text{ \AA}$.

2.4.4 *Albite* ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$)

Merupakan kelompok mineral feldspar yang paling melimpah di kerak bumi, memiliki unsur-unsur seperti natrium (Na), kalsium (Ca) dan Silikon (Si). Memiliki bentuk kristal *anorthic*, dengan dimensi sel $a = 8,144 \text{ \AA}$, $b = 12,787 \text{ \AA}$, $c = 7,16 \text{ \AA}$.

2.4.5 *Nepheline* ($\text{K}_2\text{NaAl}_3(\text{SiO}_4)_3$)

Merupakan mineral dalam kelompok *tectosilicate* dan klasifikasi mineral *feldsparoid*. Mineral ini mengandung unsur natrium (Na), kalium (K), Silikon (Si) dan Aluminium (Al). Memiliki bentuk kristal *hexagonal*, memiliki dimensi sel $a = 10,01 \text{ \AA}$, $c = 8,405 \text{ \AA}$.

2.4.6 *Diopside* (Ca(Mg)SiO₂)

Merupakan suatu mineral dalam kelompok piroksen, yang merupakan kelompok mineral silikat yang penting. *Diopside* terdiri dari kalsium (Ca), magnesium (Mg), silikon (Si), dan oksigen (O). Memiliki bentuk kristal *monoclinic* dengan dimensi sel $a = 9,761 \text{ \AA}$, $b = 8,926 \text{ \AA}$, $c = 5,258 \text{ \AA}$.

2.5 Struktur Mineral *Fly Ash*

Mineral-mineral yang terkandung dalam *fly ash* berasal dari mineral-mineral yang berasal dari pembakaran batu bara pada pembangkit listrik.

2.5.1 *Quartz* (SiO₂)

Quartz merupakan mineral yang umum ditemui pada kerak bumi. Mineral ini tersusun dari silika dioksida, berwarna putih. Memiliki bentuk kristal *hexagonal*, memiliki dimensi sel $a = b = 4,9133 \text{ \AA}$, $c = 5,4053 \text{ \AA}$.

2.5.2 *Mullite* (Al₆Si₂O₁₃)

Mullite adalah suatu mineral yang tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki ketahanan terhadap perubahan kimia. Mineral ini terdiri dari unsur Aluminium (Al) dan Silikon (Si). Memiliki bentuk kristal *orthorombic*, dengan dimensi sel $a = 7,5785 \text{ \AA}$, $b = 7,6817 \text{ \AA}$, $c = 2,8864 \text{ \AA}$.

2.6 *Polyurethan*

Poliuretan (PU) adalah polimer sintetik yang terbuat dari campuran fasa padat dan gas dengan fungsi uretana (-NHCOO-) dalam rantai utama. Poliuretan adalah campuran plastik dan karet yang memiliki sifat mirip dengan karet tetapi memiliki ambang pengerasan yang lebih tinggi (He *et al.*, 2002).

Sintesis PUF (*Polyurethane Foam*) memiliki dua reaksi utama, seperti reaksi pembentukan gel dan pembentukan busa. Reaksi membentuk gel berkaitan dengan pembentukan ikatan yang merupakan hasil uji isosianat dan gugus hidroksil (Scarfato *et al.*, 2017). Pembuatan poliuretan busa menggunakan cara pre-saturasi pada berbagai dan tekanan yang menggunakan gas untuk menghasilkan busa dengan sifat struktural dan fungsional yang lebih baik (Rashmi *et al.*, 2013).

Ada dua jenis poliuretan yaitu komponen A dengan polioliol yang memiliki warna coklat kehitaman, dan komponen B dengan isosianat yang memiliki warna kuning. Fungsi senyawa ini antara lain sebagai pengembang sel dekat dan senyawa aditif (Heintz *et al.*, 2005). Banyak keuntungan yang dimiliki poliuretan, antara lain elastisitas tinggi, kekuatan mekanik relatif tinggi terhadap silikon, ketahanan benturan tinggi, dan isolasi tinggi. Banyak industri yang menggunakan bahan ini yang digunakan untuk konstruksi pelapis dan aplikasi lainnya (Lim *et al.*, 2008).

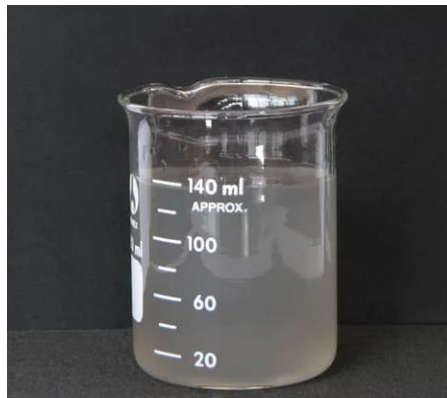
2.7 Binder

Binder atau perekat adalah pengikat tambahan yang digunakan sebagai formula untuk menyatukan bahan material. *Binder* yang digunakan yaitu Natrium hidroksida (NaOH) dan Natrium silikat (*water glass*). NaOH yang dimaksud adalah senyawa ionik yang tersusun dari putih padatan dan anion hidroksida OH (Ahmadi *et al.*, 2019).



Gambar 2.4 Natrium hidroksida.

Sedangkan *water glass* terdiri dari bubuk putih transparan yang tidak berwarna dan larut dalam air berbagai jumlah, memiliki kekentalan yang tinggi, sehingga berpengaruh terhadap konstruksi geopolimer yang berfungsi meningkatkan kuat tekan dan perekat material. *Water glass* berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan NaOH berperan sebagai aktivator yang berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si (Mustafa *et al.*, 2012). *Water glass* dan NaOH dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat dan memberikan kekuatan pada *cellular glass ceramic* (Rangan dan Tumpu, 2022).



Gambar 2.5 Natrium silikat.

2.8 Metode *Direct Foaming*

Metode yang paling banyak diteliti untuk pembuatan *cellular glass ceramic* adalah metode *direct foaming* (Hribar *et al.*, 2020). Metode *direct foaming* yaitu metode dengan cara gas dimasukkan ke dalam suspensi dalam bentuk gelembung gas dengan mencampurkan bahan peniup pelepas gas, atau dengan menyebabkan pengendapan gas yang sebelumnya telah dilarutkan dalam cairan. Metode *direct foaming* merupakan metode yang efektif (Sarkar *et al.*., 2015).

Melalui metode *direct foaming* memungkinkan kontrol yang lebih baik dari interaksi antara bubuk dan partikel, dan meningkatkan homogenitas dalam partikel dalam tahap basah yang mengarah pada cacat yang lebih sedikit (Jang *et al.*, 2017). Metode *direct foaming* bergantung pada penggunaan surfaktan untuk menstabilkan busa yang dihasilkan oleh gelembung gas melalui suspensi. Metode *direct foaming* menghasilkan bahan berpori dengan memasukkan udara ke dalam suspensi atau media cair. Struktur busa kemudian diatur dengan sintering suhu tinggi untuk mendapatkan *cellular glass ceramic* kekuatan tinggi yang bebas retak (Kim *et al.*, 2019).

2.9 Pengujian dan Karakterisasi

Pengujian dan karakterisasi pada sampel meliputi:

2.9.1 Porositas

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan volume pori (volume yang ditempati oleh fluida) terhadap total volume benda uji (Sultan *et al.*, 2019). Porositas adalah perbandingan pori-pori atau ruang kosong dalam sampel terhadap volume benda (total volume sampel). Porositas juga dapat diakibatkan partikel-partikel

bahan penyusun sampel yang relatif besar, sehingga kerapatan tidak maksimal. Porositas menggambarkan besar kecilnya kekuatan sampel dalam menopang suatu konstruksi. Semakin padat sampel, semakin tinggi tingkat kepadatan maka semakin besar kuat tekan atau mutu sampel (Tumingan *et al.*, 2016). Menurut ASTM-C 642-06 penentuan nilai porositas di peroleh dengan menggunakan persamaan **2.1**

$$\text{Porositas} = \frac{W_2 - W_1}{W_2 - W_3} \times 100\% \quad (2.1)$$

dengan w_1 adalah massa awal (g) sedangkan w_2 adalah massa setelah direndam (g) lalu w_3 adalah massa di dalam air (g).

2.9.2 Kuat Tekan

Kekuatan tekan adalah kemampuan suatu material untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, semakin tinggi pula mutu sampel yang dihasilkan. (Swardika *et al.*, 2019). Metode pengukuran yang paling umum adalah standar (ASTM C-305-82, 2001) dengan menggunakan rumus perhitungan kuat tekan sampel pada **Persamaan 2.2**.

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

dengan p adalah kuat tekan sampel dengan satuan Pa, lalu F adalah beban maksimum (N) sedangkan A adalah luas penampang benda uji (m^2).

2.9.3 Massa Jenis

Massa jenis (*density*) adalah pengukuran massa setiap satuan volume benda. Semakin tinggi massa jenis suatu benda, maka semakin besar pula massa setiap volumenya (Sitindaon dan Harahap, 2014). Pengujian densitas dilakukan agar

mengetahui kerapatan antar molekul dalam sintesis *foaming agent* yang dihasilkan (Wahyuni dan Dhora, 2019). Densitas adalah sifat fisis yang mengilustrasikan kerapatan ikatan material-material penyusunan batuan. Densitas batuan terdiri dari densitas asli (*natural density*) merupakan densitas batuan dengan keadaan aslinya, densitas kering (*dry density*) merupakan densitas batuan dengan situasi susut sesudah memanaskan batuan, dan densitas jenuh (*saturated density*) merupakan densitas batuan dengan situasi keadaan jenuh sesudah batuan dijenuhkan dalam suatu fluida. Menurut ASTM-C 642-06 nilai massa jenis dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3

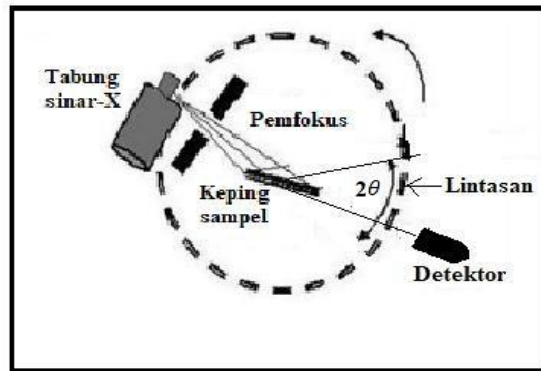
$$\rho = \frac{w_1}{w_1 - w_2} \times \rho_{air} \quad (2.3)$$

dengan ρ_{air} adalah g/cm^3 sedangkan w_1 adalah massa setelah direndam (g) lalu w_2 adalah massa didalam air (g)

2.9.4 X-Ray Diffraction (XRD)

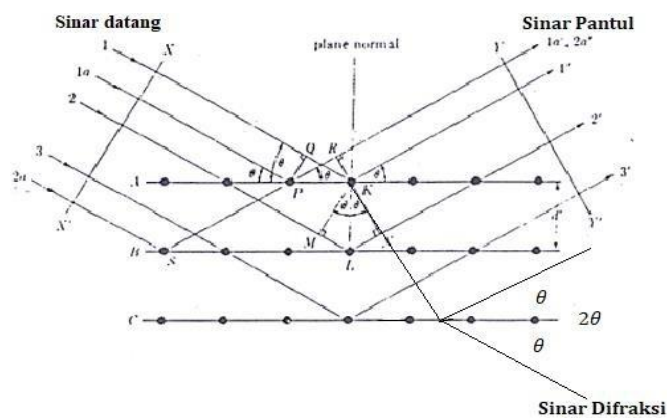
X-Ray Diffraction (XRD) *X-ray Diffraction (XRD)* merupakan metode analisa yang mampu mengidentifikasi karakteristik material kristalit yang dilihat dari struktur (kualitatif), fasa (kuantitatif), ataupun ukuran butir dari sebuah sampel dengan menggunakan radiasi gelombang elektromagnetik sinar-X. Sinar-X 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 (Cullity, 1992). Cara kerja alat *X-ray diffraction* dapat dilihat

pada **Gambar 2.6.**



Gambar 2.6. Kerja alat X-Ray Diffraction.

Gambar 2.6. Merupakan cara sederhana 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. Difraksi sinar-X oleh sebuah kristal ditunjukkan pada **Gambar 2.7.**



Gambar 2.7. Difraksi sinar-X oleh sebuah kristal.

Gambar 2.7. Menunjukkan beberapa kristal yang atom-atomnya terdiri dari bidang paralel A, B, C, D, ... yang terpisah sejauh d . Atom-atom yang tersusun searah akan dianggap membentuk satu bidang cermin maka bila terdapat sinar datang pada bidang itu kemudian akan dibelokkan berdasarkan dengan prinsip optik.

Setelah bidang permukaan atas, pada bagian bawah terdapat bidang yang sejajar dengan bidang pertama dan seterusnya. Jarak antar bidang tersebut diistilahkan dengan d . Oleh karena itu, difraksi sinar-X memenuhi Hukum Bragg sebagaimana persamaan (2.4)

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

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. Berdasarkan persamaan Bragg diatas, 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 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 (Cullity, 1959).

2.9.5 X-Ray Fluorescence (XRF)

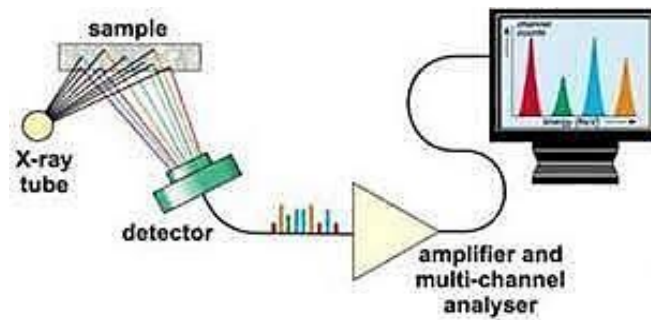
Analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF) adalah salah satu jenis analisis yang didasarkan pada pendeteksian radiasi dalam suatu atom. Interaksi antara atom dengan cahaya dapat menimbulkan berbagai fenomena yang dipengaruhi oleh kuatnya intensitas cahaya yang berinteraksi dengan atom tersebut. Ketika suatu bahan berinteraksi dengan cahaya yang berenergi tinggi (misalnya sinar-X), maka dapat menyebabkan terpentalnya elektron yang berada pada tingkat energi paling rendah pada suatu atom. Akibatnya atom berada pada keadaan yang tidak stabil sehingga elektron yang berada pada tingkat (kulit valensi) yang lebih tinggi akan

mengisi posisi kosong yang ditinggalkan oleh elektron yang terpental tadi. Proses pengisian posisi elektron pada kulit valensi yang lebih rendah dinamakan deeksitasi (Setiabudi *et al.*, 2012).

Dalam analisis XRF, karakteristik sinar-X yang muncul akibat efek fotolistrik dikenali dan dikuantifikasi. Efek fotolistrik dapat terjadi ketika electron dalam atom target (sampel) dikenai foton berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X). Jika energi ikat elektron pada orbit K, L, atau M atom target lebih besar dari energi cahaya, elektron akan keluar dari orbitnya dan akan terjadi kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital terluar yang diikuti dengan pelepasan energi dalam bentuk sinar-X (Robyani, 2020).

Sinar-X yang dihasilkan mengandung spektrum kontinu serta spektrum energi tertentu yang berasal dari bahan target yang mengganggu elektron. Transfer elektron yang terjadi dalam atom bahan menentukan jenis spektrum diskrit yang dihasilkan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X biasa.

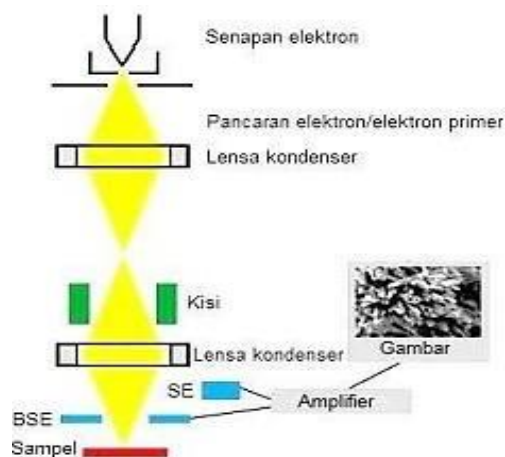
Spektrometer XRF menggunakan sinar-X yang dipancarkan oleh sampel dan ditangkap oleh detektor untuk menentukan komposisi unsur suatu material. Bahan yang dapat diselidiki termasuk padatan masif, pelet, dan bubuk. Analisis unsur dilakukan dalam format kualitatif dan kuantitatif. Konsentrasi unsur-unsur dalam suatu bahan ditentukan dengan analisis kuantitatif, sedangkan berbagai unsur yang termasuk dalam zat ditentukan dengan pemeriksaan kualitatif (Munasir, 2012).



Gambar 2.8. Kerja alat *X-Ray Flourescence* (Sari, 2016).

2.9.6 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah sebuah mikroskop elektron dengan teknik analisis yang sudah banyak digunakan dalam membantu guna mengatasi permasalahan analisis struktur mikro dan morfologi yang dapat memberikan hasil analisis secara detail dalam berbagai material seperti keramik, polimer dan komposit. Menggunakan resolusi yang tinggi, SEM dapat memberikan informasi dalam skala atomik. SEM difasilitasi dengan sistem pencahayaan 2θ menggunakan radiasi elektron yang memiliki daya pisah dalam ukuran 1-200 Å, sehingga dapat difokuskan dalam bentuk titik yang sangat kecil atau hingga perbesaran 1.000.000 kali. SEM memiliki daya pisah dalam skala nano dengan kemampuan perbesaran sekitar 500.000 kali (Reed, 1993). Cara kerja alat SEM ditunjukkan pada **Gambar 2.9.**



Gambar 2.9. Kerja alat SEM (Sharma dkk., 1999).

Berdasarkan **Gambar 2.9** menunjukkan bahwa elektron yang keluar dari senapan elektron atau elektron primer dengan energi yang sangat besar secara langsung tepat menumbuk atom sampel yang telah ditargetkan karena pengaruh lensa kondenser dan kisi, ketika terjadinya interaksi antara elektron primer dan elektron terluar dari sampel, contoh kulit K, pada saat itu juga terjadi sebuah hamburan elektron yang mengakibatkan elektron di kulit K terpental (tereksitasi) keluar karena energinya lebih kecil daripada energi elektron primer. Oleh karena itu, elektron primer dapat memberikan sisa energinya pada elektron-elektron yang ada di kulit L, M, N dan seterusnya dengan cara menjatuhkan dirinya hingga menuju kulit yang terdekat dengan inti. Untuk elektron-elektron yang berada pada kulit-kulit di atasnya akan kelebihan energi sehingga secara beraturan, elektron-elektron tersebut masing-masing akan naik menuju ke kulit terluar. Ketika elektron kelebihan energi dan pindah ke kulit yang di atasnya maka akan menimbulkan sinar-X. Dengan melihat kejadian-kejadian tersebut, mikroskop elektron menggunakan panjang gelombang sinar-X yang keluar dari sampel (Sharma dkk., 1999).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu Dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada tanggal 15 Juni 2023 – 17 Agustus 2023 yang bertempat di JL. Sutani Km 15 Tanjung Bintang, Lampung Selatan, Laboratorium Non Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan (BRIN) Lampung.

3.2 Alat Dan Bahan

Adapun alat yang akan digunakan pada proses penelitian ini terdiri dari ayakan 400 *mesh* merk ASTM:E11 nakatama scientific, timbangan digital merk *gold series ohaus*, mika, oven, *furnace* merk *mini box muffle*, alat potong tipis merk *struers* tipe *secotom-20*, mesin *polishing* merk *struers* tipe *Tegramin-25*, mesin uji kuat tekan merk *Universal Testing Machines* (UTM) made in Thailand tipe HT-2402, SEM tipe *quatro thermo scientific*, XRD PANalytical tipe *ExpertPro*, dan XRF PANalytic tipe *Minipal 4*. Sedangkan bahan-bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu *basalt*, *fly ash*, NaOH, *water glass*, *polyurethane foam* A dan B, serta resin.

3.3 Prosedur Penelitian

Proses yang akan dilakukan adalah preparasi bahan, proses pembuatan sampel dan uji karakterisasi.

3.3.1 Preparasi Bahan

1. Batu *basalt* scoria asal Mataram Baru, Lampung Timur dan *fly ash* yang berasal dari PLN Tarahan, Lampung Selatan. Bahan dihancurkan dengan *ballmill* selama 3 jam.
2. Batu *basalt* dan *fly ash* disaring dengan ayakan 400 mesh
3. Serbuk *basalt* dan *fly ash* 325 mesh ditimbang masing-masing 1 g untuk dikarakterisasi awal menggunakan XRD dan XRF yang terdapat di Lab Analisa Pusat Riset Teknologi Pertambangan (BRIN) Lampung.

3.3.2 Proses Pembuatan Sampel

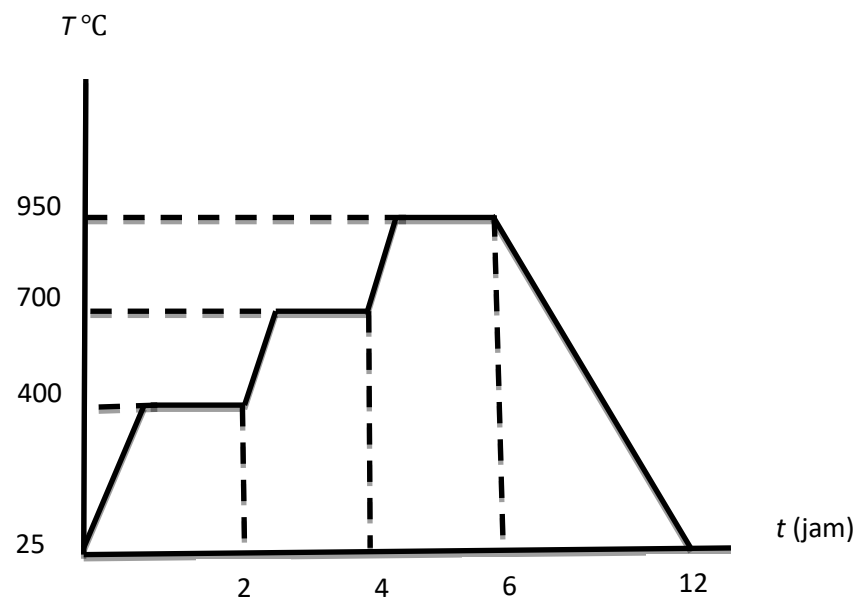
1. Serbuk *basalt* dan *fly ash* ditimbang 40 gram sesuai dengan variasi komposisi dan *polyurethane foam* seperti pada **Tabel 3.1**.
2. Kemudian dicampurkan dengan *binder* yaitu *water glass* dan NaOH dengan komposisi 80% dari massa *basalt* dan *fly ash*.
3. Lalu divariasikan kembali dengan *polyurethane foam* yang ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Proses pembuatan sampel

Variasi	Komposisi <i>Basalt</i> : <i>Fly ash</i> (%)					
	50 : 50	60 : 40	70 : 30	80 : 20	90 : 10	
<i>PU Foam</i>	30%	30B5F5	30B6F4	30B7F3	30B8F2	30B9F1
	40%	40B5F5	40B6F4	40B7F3	40B8F2	40B9F1
	50%	50B5F5	50B6F4	50B7F3	50B8F2	50B9F1

4. Campuran serbuk *basalt* dan *fly ash* diaduk \pm 3 menit.
5. NaOH 3 M dan *waterglass* dengan perbandingan 1:2 lalu diaduk \pm 3 menit.
6. Padatan dan cairan diaduk hingga homogen selama \pm 3 menit.
7. *Polyurethane* A dan B ditambahkan dengan perbandingan 1:1 sesuai variasi solid loading seperti pada **Tabel 3.1**.

8. Campuran bahan diaduk merata dengan cepat \pm 1 menit dan dimasukkan dalam cetakan berbentuk tabung dengan ukuran t : 16 cm dan d : 4 cm.
9. Sampel didiamkan dalam suhu ruang selama 24 jam kemudian dilepaskan dari cetakan.
10. Sampel dioven pada suhu 60°C selama 24 jam lalu dipotong menjadi 3 bagian tiap sampel.
11. Sampel dipanaskan dalam furnace pada suhu 400°C , 700°C , dan 950°C kemudian ditahan selama 2 jam dengan pendinginan di dalam tungku.



Gambar 3.1 Diagram perlakuan panas.

3.3.3 Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis Sampel

Tahap pelaksanaan pengujian sampel berdasarkan SNI 15-2094-2000 pada penelitian ini sebagai berikut.

1) Kuat tekan

1. Sampel *cellular glass* yang telah diangkat dari air disiapkan dan telah didiamkan selama 24 jam.

2. Sampel diletakkan simetris dengan mesin uji kuat tekan.
3. Sampel dilihat pada saat uji kuat tekan, kemudian dicatat beban tekan maksimum yang dihasilkan oleh benda uji ketika *dial* tidak naik lagi atau saat benda uji sudah hancur.
4. Kuat tekan dihitung dengan persamaan (2.2).

2) Pengujian densitas dan porositas

Langkah-langkah pengujian densitas dan porositas pada *cellular glass ceramic* adalah sebagai berikut.

1. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital (W_1).
2. Sampel direndam kedalam air selama 24 jam, tujuannya agar permukaan benar-benar basah.
3. Sisi permukaan sampel yang berisi air diusap menggunakan kain lap, kemudian ditimbang pada timbangan digital dan dicatat massa sampel setelah direndam dalam air (W_2).
4. Sampel ditimbang kembali dalam keadaan digantung dalam air (W_3). Dan dihitung densitas dan porositas dengan Persamaan (2.3) dan (2.1).

3.3.4). Karakterisasi sampel

Sampel *cellular glass ceramic* dikarakterisasi menggunakan SEM Quattro S, XRD PanAnalytical type expertpro, dan XRF PanAnalytical Type minipal 4 sebagai berikut .

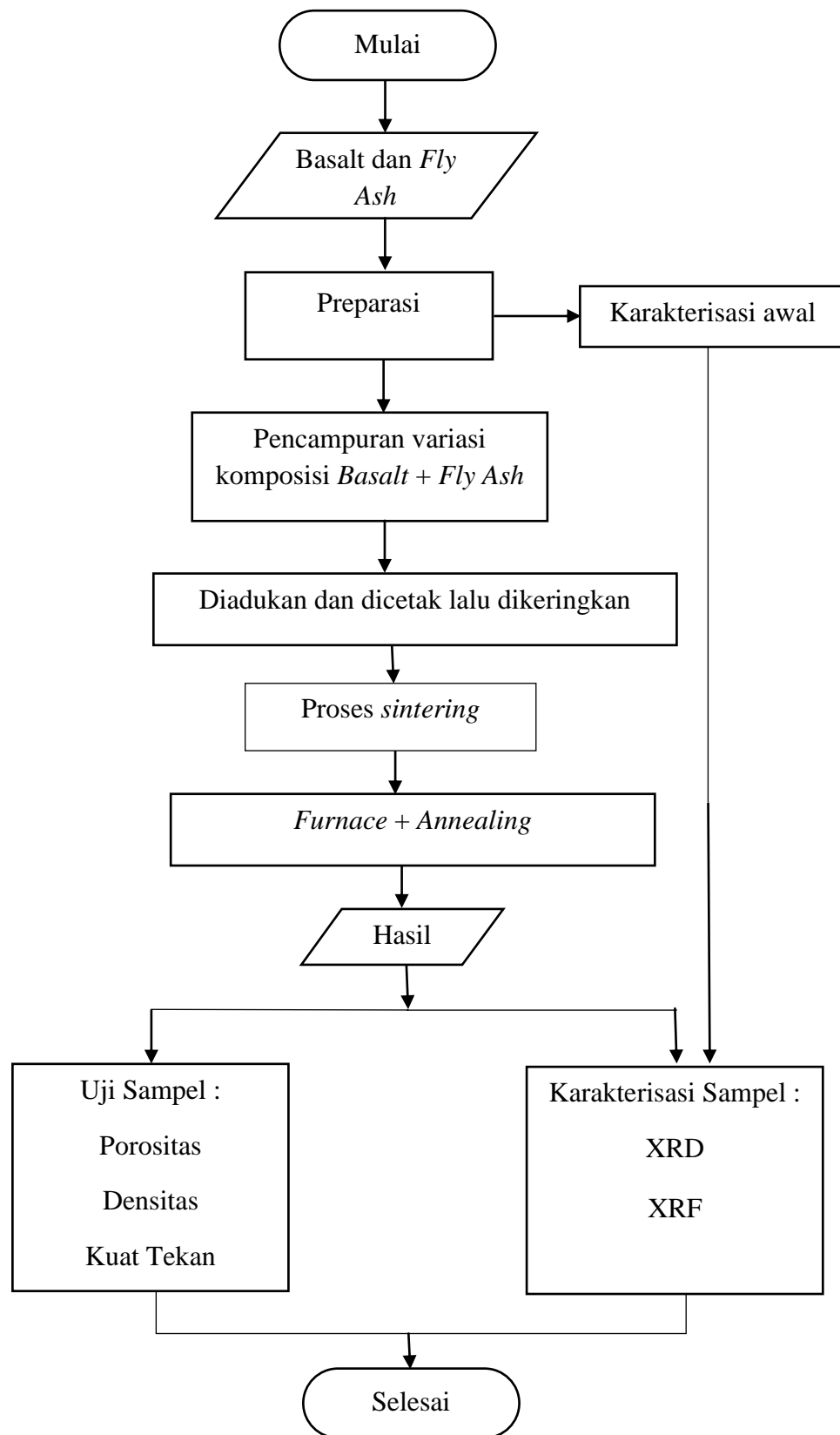
1. Setiap satu bagian sampel di mounting menggunakan bahan resin dan katalis.
2. Setelah mounting sampel di polishing menggunakan mesin polish dari grid

600, 800, 1000, 1200 hingga 2000 untuk memperoleh permukaan *cellular glass* yang mengkilap.

3. Semua sampel dikarakterisasi menggunakan SEM.
4. Sisa 1 bagian sampel dihaluskan menggunakan mortar.
5. Setiap sampel yang telah halus disaring menggunakan ayakan ukuran 325 mesh.
6. Setiap sampel ditimbang sebanyak 2 gram.
7. Semua sampel dikarakterisasi menggunakan XRD dan XRF

3.4 Diagram Alir

Proses penelitian secara keseluruhan disajikan dalam bentuk diagram alir seperti yang ditunjukkan **Gambar 3.1**



Gambar 3.1 Diagram alir percobaan.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, diperoleh beberapa kesimpulan yaitu:

1. Berdasarkan hasil karakterisasi XRF komposisi kimia yang dominan dari *cellular glass ceramic* adalah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan CaO .
2. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD fase terbanyak yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* adalah anorthite, albite, dan nepheline.
3. *Cellular glass ceramic* dengan sampel yang didominasi oleh *basalt* maka kuat tekan yang diperoleh semakin besar, sedangkan jika persentase PU semakin besar maka porositas semakin besar yang berarti kuat tekan berbanding terbalik dengan porositas.
4. Berdasarkan hasil karakterisasi SEM pada *cellular glass ceramic* pada sampel 50B7F3 memiliki jumlah pori tertinggi dengan ukuran $\leq 1\text{mm}$ sekitar 80% dan $\geq 1\text{ mm}$ sekitar 20%.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya memerlukan kehati-hatian dan ketelitian dalam proses pembuatan sampel untuk mencapai hasil yang optimal dan mengurangi potensi kesalahan yang dapat mempengaruhi kualitas hasil sampel.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmadi, M., dan Seyedina H.S. 2019. Investigation of NaOH Properties, Production and Sale Mark in the world. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*. Vol. 06. No. 10. Hal. 10809-10813.
- Ahmaruzzaman, M. 2010. A Review on The Utilizat Ion of Fly Ash. *Prog Energ Combust*. Vol. 36. No. 36. Hal. 327-363.
- Amin, M., dan Suharto. 2017. Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basalt Guna Menuju Lampung Sejahtera. Inovasi Pembangunan. *Jurnal Kelitbangan*. Vol. 05. No. 01. Hal. 30–45.
- Anthony, E., Berry, E., Blondin, J., Bulewicz, E., Burwell, S. 2003. Advanced Ash Management Technologies for CFBC ash. *Waste Management*. Vol. 23. No. 06. Hal. 8-12.
- Ardi, A.W., Iswadi., Said M. 2016. Uji Kuat Tekan Daya Serap Air dan Densitas Material Batu Bata dengan Penambahan Agregat Limbah Botol Kaca. *Jurnal Fakultas Teknik*. Vol. 03. No. 01. Hal. 4-5.
- ASTM C618. 2003. *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA (USA). ASTM International.
- Birawidha, D., Hendronursito Y., Isnugroho K., Amin M., Handoko A., Nuringjati S., dan Syafriadi. 2022. Effect of CaCO₃ and Lime Glass Using to Pore Structure Forming on A Ceramic Glass Based on Skoria Basalt Rocks. *Indonesian Mining Jurnal*. Vol. 25. No. 02. Hal. 2-3.
- Birawidha, D. C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Amin, M., Muttaqii, M. A. The X-Ray Diffraction (XRD) Analysis of Basalt from Mataram Baru Via Slow and Rapid Cooling Process. 2019. *Jurnal Ilmiah*. Vol. 13. No. 02. Hal. 5.
- Chi, Y., Lin, J., dan Xu, B. 2019. Effects of Fe₂O₃ on the Properties of Glass Foams Prepared by Iron-Containing Solid Waste. *Glass Physics and Chemistry*. Vol. 45. No. 02. Hal. 4.

- Cullity, B.D. 1978. *Element of X-Ray Diffraction*. Departement of Metallurgical Engeenering and Materials Science. Addison-Wesley Publishing CoMPany. USA. Hal. 20-22.
- Davis, FA dan Cottrell, E. 2021. Partitioning of Fe₂O₃ in Peridotite Partial Melting Experiments Over A Range of Oxygen Fugacities Elucidates Ferric Iron Systematics in Mid-Ocean Ridge Basalts and Ferric Iron Content of the Upper Mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. Vol. 176. No. 9. Hal. 67.
- Diana, A. L., dan Fansuri S. 2020. Pengaruh Penambahan Limbah Botol Plastik dan Variasi Fly Ash Terhadap Penyerapan Paving Blok Ramah Lingkungan. *Journal of Science and Technology*. Vol. 13. No. 01. Hal. 2.
- Djiwantoro, H. 2001. *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*. Sinar Harapan. Jakarta.
- ESDM. 2015. *Indonesia Mineral and Coal Information*. Direktorat Jendral EDSM Republik Indonesia. Jakarta. Hal. 14.
- Fansuri, H. 2010. *Modul Pelatihan Operasional Xrf*. Laboratorium Energi dan Rekeyasa. LPPM ITS. Semarang. Hal. 12-13.
- Hisham, N.A.N., Zaid M.H.M., Aziz S., Muhammad, D.F. 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*. Vol. 14. No. 03. Hal. 9-10.
- Huo, W., Yan S., Wu J. M., Liu J., Chen Y., Qu Y., Tang X., dan Yang, J. 2017. A Novel Fabrication Method for Glass Foams with Small Pore Size and Controllable Pore Structure. *Journal of the American Ceramic Society*. Vol. 11. No. 12. Hal. 5502–5511.
- Hribar, U., Spreitzer M., dan Konig, J. 2020. Applicability of water glass for the transfer of the glass-foaming process from controlled to air atmosphere. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 28. No. 02. Hal. 2.
- Hunggurami, E., Bunganaen W., dan Muskanan, R. Y. 2014. Studi Eksperimental Kuat Tekan dan Serapan Air Bata Ringan Cellular Lightweight Concrete dengan Tanah Putih sebagai Agregat. *Jurnal Teknik Sipil*. Vol. 03. No. 02. Hal. 125–136.
- Imam, S., dan Supriyadi. 2014. Struktur Bawah Permukaan Sekaran dan Sekitarnya Berdasarkan Data Gaya Berat. *Unnes Physics Journal*. Vol. 03. No. 01. Hal. 4.

- Jang, W. Y., Seo D. N., Basnet B., Park J. G., Han I. S., dan Kim, I. J. 2017. Menjahit Struktur Mikro $Al_2HAl_3-SiO_2$ Keramik Berpori melalui Konsolidasi Pati dengan Pembusaan Langsung. *Journal of Seram*. Vol. 18. No. 04. Hal. 275–79.
- Kamid, T. S., Subagia, I. A., dan Wirawan, I. G. 2019. Karakteristik Komposit Hibrida Serat Basalt–Karbon Epoksi Resin pada Perendaman Air Laut. *JournalMettek*. Vol. 05. No. 01. Hal. 3-4.
- Kartika, I., Andi, M.A., Adhitya, T., Franciska, P.L., dan Aprilia E. 2019. Analisis Struktur pori dan Sifat Mekanik Paduan Mg-0,5Ca-4Zn Hasil Proses Metalurgi Serbuk dengan Variasi Komposisi Foaming Agent $CaCO_3$ dan Temperatur Sintering. *Teknik*. Vol. 40. No. 03. Hal. 2.
- Kim, E., Kim K., Song O. 2020. Properties of Basalt-Fiber Reinforced Foam Glass. *Journal Home Page*. Vol. 01. No. 01. Hal. 1-2.
- Kim, I. J., Park J. G., Muda H., Kim S. Y., dan James, F. 2019. Wet Foam Stability from Colloidal Suspension to Porous Ceramics: A Review. *Journal of the Korean Ceramic Society*. Vol. 56. No. 03. Hal. 2.
- Kuznia, M., Magierra, A., Kowalska, B. Z., Chrobak K. K., Pielichowska, K., Szatkowski, P., Benko, A., Ziabka M., Jerzak, W. 2021. Fly Ash as an Eco-Friendly Filler for Rigid Polyurethane Foams Modivication. *Materials*. Vol. 14. No. 21. Hal. 4-5.
- Lim, H., S.H. Kim dan B.K. Kim. 2008. Pengaruh Nilai Hidroksil Polioliol dalam Busa Poliuretan. *Teknologi Polimer Lanjutan*. *Polim Lanjut Technol*. 1729-1734.
- Liu, T., Lin C., Liu J., Han L., Gui H., Li C., Zhou X., Tang H., Yang Q., dan Lu A. 2018. Phase Evolution, Pore morphology and Microstructure of Glass Ceramic Foams Derived from Tailings Wastes. *Ceram Int*. Vol. 44. No. 12. Hal. 2.
- Manullanga, J.R., Purnawan M., Taufik D., Ratnasari D., Noordiningsih K. 2021. Fabrikasi Ceramic Foam Filter Berbasis Kordierit dengan Metode Replika Fabrication of Cordierite Ceramic Foam Filter by Replication Method. *Fabrikasi Ceramic Foam Filter*. Vol. 30. No. 01. Hal. 35-45.
- Marangoni, M., Secco M., Parisatto M., Artioli G., Bernardo E., Colombo P., Altasi H., Binmajed M., dan Binhussain M. 2014. Cellular Glass Ceramic-Ceramics from A Self Foaming Mixture of Glass and Basalt Skorja. *Journal of Non-crystalline Solids*. Vol. 403. No. 02. Hal. 38–46.
- Maryoto Agus. 2008. Pengaruh Penggunaan High Volume Fly Ash pada Kuat Tekan Mortar. *Jurnal Teknik Sipil Dan Perencanaan*. Vol. 10. No. 02. Hal. 1.

- Munasir, M., Triwikantoro T., Zainuri M., dan Darminto D. 2012. Uji XRD dan XRF pada Bahan Meneral (Batuan dan Pasir) sebagai Sumber Material Cerdas (CaCO_3 dan SiO_2). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. Vol. 02. No. 01. Hal. 20-29.
- Mursal, I. L. P. 2016. Pengaruh Penambahan Asam Borat (H_3BO_3) terhadap Hasil Karakterisasi Nanokristal TiO_2 . *Pharma Xplore: Jurnal Sains Dan Ilmu Farmasi*. Vol. 01. No. 02. Hal. 2-3.
- Mursal, I. L. P. 2018. Karakterisasi XRD dan SEM pada Material Nanopartikel serta Peran Material Nanopartikel dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore: Jurnal Sains Dan Ilmu Farmasi*. Vol. 03. No. 02. Hal. 2.
- Musci, G., Hoffman L., Kertesz M., dan Csoke B. 2013. Physical Characteristics and Technology of Glass Foam from Waste Cathode Ray Tube Glass. *Journal of Materials*. Vol. 13. No. 02. Hal. 1-11.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin H., Binhussain M., Rafiza A. R., dan Zarina Y. 2012. Effect of Na_2SiO_3 Ration on Compressive Strength of Fly Ash Based Geopolymer. *ACI Material Journal*. Vol. 105. No. 02. Hal. 4-6.
- Niu, Y.H., Fan, X.Y., Ren, D., Wang, W., Li, Y., Yang, Z., dan Cui, L. 2020. Effect of Na_2CO_3 Content on Thermal Properties of Foam-Glass Ceramics Prepared From Smelting Slag. *Materials Chemistry and Physics*. Vol. 256. No. 02. Hal. 4.
- Oladijo, O.P., Poopola A.P.I., Booi M., Fayomi J., Collieus L.L. 2020. Corrosion and Mechanical Behaviour of Al_2O_3 TiO_2 Composites Produced by Spark Plasma Sintering. *South African Journal of Chemical Engineering*. Vol. 33. No. 02. Hal. 4-5.
- Olivia, M., Kamaldi A., Sitompul R. I., Diyanto I., dan Saputra E. 2015. Properties of Geopoliper from Locak Fly Ash (FA) and Palm Oil Fuel Ash (POFA). *Materials Science Forum*. Vol. 803. No. 11. Hal. 110-114.
- Ostergaard, M.B., Zhang M., Shen X., Petersen R.R., Konig J., dan Lee P.D. 2020. High Speed Synchrotron X-ray Imaging of Glass Foaming and Thermal Conductivity Simulation. *Acta Mater*. Vol. 189. No. 01. Hal. 85-92.
- Petersen, R.R., Konig J., dan Yue Y. 2017. The Viscosity Window of the Silicate Glass Foam Production. *Journal of Non Crystallin*. Vol. 456. No. 02. Hal. 49-54.
- Pratiwi, D.W., Wiyati W., Winata D.W. 2010. Pengaruh Konsentrasi SiO_2 pada Larutan Aktivator terhadap Kuat Tekan dan Ketahanan Api Geopolymer berbasis Metakaolin. *Ceramic Materials*. Vol. 02. No. 02. Hal. 2-3.

- Rajiman dan Listari, V. 2019. Analisis Variasi Suhu Pemanasan Serbuk Batu Basalt sebagai Bahan Pengisi Ordinary Portland Cement terhadap Kuat Tekan Beton. *JRSDD*. Vol. 07. No. 04. Hal. 515–523.
- Rangan, M., dan Tumpu M. 2022. *Konsep Dasar Geopolimer. Bahan Pengikat Yang Ramah Lingkungan*. Graha ilmu. Yogyakarta.
- Rashmi, B. J., D. Rusu K. Prashantha M. F. Lacrampe dan P. Krawzak. 2013. Pengembangan Water-Blow Bio-Poliuretan Termoplastik Berbahan Dasar Busa Menggunakan Bio-Derived Chain Extender. *Jurnal Polimer Terapan Sains*. 361-365.
- Reed, S. J. B. 1993. *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*. Florida Cambridge University Press.
- 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*. Vol. 12. No. 03. Hal. 5.
- Saparuddin, D.I., Hisham N.A.N., Aziz S.A., Matori K.A., Honda S., Iwamoto Y., 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*. Vol. 09. No. 03. Hal. 3-4.
- Sarkar, N., Park J. G., Mazumder S., Aneziris C. G., dan Kim I. J. 2015. Pengolahan Partikel Stabil Al₂TiO₅-ZrTiO₄ Busa hingga Keramik Berpori. *Eur Seram*. Vol. 35. No. 14. Hal. 39–76.
- Scarfato, P., L.D. Maio dan L. Incarnato. 2017. *Struktur dan Fisik-Sifat Mekanik Terkait dengan Reaksi Polyurethane yang Fleksibel Busa untuk Bercampur dan Pengaruh Pembusaan Buatan*. Bagian Komposit B. 45-52.
- Scarinci, G., Brusatin G. and Bernardo E. 2006. *Glass foams in Scheffler, M. and Colombo, P. (Eds.): Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. Jerman. Hal. 4-5.
- Sharma, H. S. S., Mc Call, D., dan Kernaghan, K. 1999. *Scanning Electron Microscopy, X-ray Microanalysis, and Thermogravimetric Assessment of Linen Fabrics Treated with Crease-Resisting Compound*.
- Sihombing, A.J., Fadli A., dan Bahruddin. 2016. Pembuatan Foam Glass Menggunakan Limbah Kaca dan Abu Terbang (Fly Ash) dari Pabrik Sawit. *Jom Fteknik*. Vol. 03. No. 01. Hal. 1-2.
- Sitindaon, D., dan Harahap, M.H. 2014. Pengaruh Penambahan Styrofoam pada Pembuatan Beton Ringan Menggunakan Pasir Merah Labuhan Batu Selatan. *Jurnal Einstein*. Vol. 02. No. 03. Hal.2.

- Sudrajat, A., dan Bayuseno A. P. 2013. Analisis Korosi dan Kerak Pipa Nickel Alloy N06025 pada Waste Heat Boiler. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 01. No. 04. Hal. 40-45.
- Sultan, M. A. Imran., Lytyloli F. 2019. Korelasi Porositas Beton terhadap Kuat Tekan Rata-Rata. *Teknologi Sipil*. Vol. 02. No. 02. Hal. 2-4.
- Sun, Y., Jianzhou S., Fujie Z., Xiaoling T., Wenqing L., Yang W., Ran Z., Saonan X., Peiping Z., Cundi W., dan Shiding M. 2020. Preparation of Nepheline Based Ceramic Foams from Basalt Tailing and Black Cotton Soil. *Waste and Biomass Valorization*. Vol. 11. No. 05. Hal. 4.
- Sunarya, Y. 2013. Kimia Dasar 2 Berdasarkan Prinsip-Prinsip Kimia Terkini. Bandung. Yrama Widya. Hal. 24-28.
- Sutarno, S.S., Akhmad A.K., dan Tatacipta D. 2015. Pengaruh Kalsia Alumina ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) pada Busa Alumunium AL-7000 dengan Agen Pembusa Kalsium Karbonat (CaCO_3). Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 02. No. 02. Hal. 4-5.
- Szycher, Michael. 2013. Szycher's. *Handbook Of Polyurethanes*. Second Edition. CRC. Press. New York. Hal. 26.
- Tarakcilar, A. R. 2011. The Effects of Intumescent Flame Retardant Including Ammonium Polyphosphate/Pentaerythritol and Fly Ash Fillers on the Physicomechanical Properties of Rigid Polyurethane Foams. *Journal Application Polymer*. Vol. 120. Hal. 6.
- Tumingan, T., Jaronge M. W., Victor S., dan Rudy D. 2016. Penyerapan dan Porositas pada Mortar menggunakan Bahan Pond Ash sebagai Pengganti Pasir. *Jurnal Politeknologi*. Vol. 15. No. 01. Hal. 3.
- Uhlmann, E., Kersting R., Klein T. B., Cruz M. F. & Borille, A. V. 2015. Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components. *Procedia Cirp*. Vol. 35. No. 02. Hal. 55-60.
- Umboh, A. H., Sumajouw M. D., dan Windah R. S. 2014. Pengaruh Pemant Abu Terbang (Fly Ash) dari PLTU II Sulawesi Utara sebagai Subti Parsial Semen terhadap Kuat Tekan Beton. *Jurnal Sipil Statik*. Vol. 02. No. 07. Hal. 352-358.
- Usta, N. 2012. Investigation of Fire Behavior of Rigid Polyurethane Foams Containing Fly Ash and Intumescent Flame Retardant by Using A Cone Calorimeter. *Journal Application Polymer*. Vol. 124. No. 04. Hal. 6-7.
- Wahyuni, S., dan Anna D. 2019. Saponifikasi-Netralisasi Asam Oleat Minyak Sawit Menjadi Foaming Agent Ramah Lingkungan. *Journal of Agroindustrial Technology*. Vol. 29. No. 03. Hal. 3-5.

- Wibowo, S.N., Bambang H. dan Johan A. 2017. Identifikasi Jenis Batuan Beku Melihat Tekstur Batuan Menggunakan Metode Discrete Wavelet Transform (dwt) dan K-nearest Neighbor (knn). *Proceedings of Engineering*. Vol. 04. No. 02. Hal. 4.
- Widojoko, L., dan Rajiman. 2011. Kinerja Mortar Abu Batu Basalt Skoria dengan Menggunakan Semen Serbaguna Baturaja dan Superplasticiser Structuro 335. *Jurnal Teknik Sipil UBL*. Vol. 02. No. 01. Hal. 79-87.
- Wijayanto, S. O., dan Bayuseno A. P. 2014. Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy N06025 pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian : Mikrografi dan Kekerasan. *Jurnal Teknik Mesin*. Vol. 02. No. 01. Hal. 34-35.
- Yilmaz, S., Ates A., Ercenk E. 2018. Crystallization Kinetics of Basalt-Based Glass-Ceramics for Solid Oxide Fuel Cell Application. *Physics and Materials Science* . Vol. 134. No. 02. Hal.4-7.
- Xiao, Z., Sun, X., Liu, K., Luo, W., Wang, Y., Luo, M., ... Liu, Y. 2016. Crystallization Behaviors, Thermo-Physical Properties and Seal Application Of Li₂O–ZnO–MgO–SiO₂ Glass-Ceramics. *Journal of Alloys and Compounds*. Vol. 657. No. 02. Hal. 2-4.
- Zhang, J., Liu B., Zhang X., Shen H., Liu J., Zhang S. 2022. Co-Vitrification of Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash and Bottom Slag: Glass Detoxifying Characteristics and Porous Reformation. *Ecotology And Environmental Safety*. Vol. 243. No. 02. Hal. 5-6.