

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN TEMPERATUR
PEMBAKARAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS*
CERAMIC BERBAHAN BASAL, SILIKA GEOTERMAL DAN KACA
MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

(Skripsi)

Oleh

**DEVI MARISKA PUTRI
NPM 2017041025**



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN TEMPERATUR PEMBAKARAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* BERBAHAN BASAL, SILIKA GEOTERMAL DAN KACA MELALUI METODE *DIRECT FOAMING*

Oleh

DEVI MARISKA PUTRI

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap pembentukan *cellular glass ceramic* menggunakan bahan basal, silika geotermal, dan kaca melalui metode *direct foaming*. Bahan utama yang digunakan terdiri dari 40% basal, dengan penambahan komposisi silika geotermal dan kaca yang divariasikan pada 10%, 30%, dan 50%. Hasil karakterisasi *Simultaneous Thermal Analysis* (STA) menunjukkan bahwa temperatur optimal dalam pembakaran *cellular glass ceramic* berada pada rentang 300°C, 700°C, dan 900°C, yang menjadi acuan variasi temperatur pembakaran secara linear dan non-linear. Hasil karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) menunjukkan senyawa kimia utama yaitu SiO₂, Fe₂O₃, dan CaO. Sementara itu, *X-Ray Diffraction* (XRD) menghasilkan fasa *albite*, *anorthite*, *augite*, *calcite*, *coesite*, *forsterite*, *diopside*, dan *halite*. Hasil *Scanning Electron Microscopy* (SEM) menunjukkan rata-rata ukuran pori terkecil pada sampel CG40/10/50-NL dan terbesar pada CG40/50/10-NL. Pengujian mekanis (kuat tekan) menghasilkan kuat tekan terkecil pada CG40/50/10-L sebesar 1,36 MPa dan terbesar pada CG40/30/30-NL sebesar 2,76 MPa. Pengujian sifat fisis (porositas dan densitas) menunjukkan hasil porositas terkecil pada CG40/30/30-NL sebesar 9,77% dan terbesar pada CG40/50/10-NL sebesar 22,58%. Sementara itu, hasil pengujian densitas menunjukkan nilai terkecil pada CG40/50/10-L sebesar 1,04 g/cm³ dan terbesar pada CG40/30/30-L sebesar 1,28 g/cm³. Sampel CG40/30/30-NL merupakan sampel terbaik karena menunjukkan keseimbangan optimal antara kuat tekan, fasa kristalin yang stabil, porositas rendah, dan densitas tinggi.

Kata kunci: *cellular glass ceramic*, basal, silika geotermal, kaca

ABSTRACT

THE EFFECT OF COMPOSITION VARIATIONS AND FIRING TEMPERATURE ON THE FORMATION OF CELLULAR GLASS CERAMICS FROM BASALT, GEOTHERMAL SILICA, AND GLASS VIA THE DIRECT FOAMING METHOD

By

DEVI MARISKA PUTRI

This research investigated the effect of composition and firing temperature variations on the formation of cellular glass ceramic using basalt, geothermal silica, and glass as raw materials through the direct foaming method. The primary material used was 40% basalt, with varying compositions of geothermal silica and glass at 10%, 30%, and 50%. Simultaneous Thermal Analysis (STA) characterization showed that the optimal firing temperatures for cellular glass ceramic were 300°C, 700°C, and 900°C, which served as the basis for the firing temperature variations in linear and non-linear approaches. The X-Ray Fluorescence (XRF) characterization revealed the main chemical compounds to be SiO₂, Fe₂O₃, and CaO. Meanwhile, X-Ray Diffraction (XRD) analysis identified the crystalline phases of albite, anorthite, augite, calcite, coesite, forsterite, diopside, and halite. Scanning Electron Microscopy (SEM) analysis showed the smallest average pore size in the CG40/10/50-NL sample and the largest in the CG40/50/10-NL sample. Mechanical testing (compressive strength) showed the lowest compressive strength in the CG40/50/10-L sample at 1.36 MPa, and the highest in the CG40/30/30-NL sample at 2.76 MPa. The physical properties testing (porosity and density) revealed the most minor porosity in the CG40/30/30-NL sample at 9.77%, and the largest in the CG40/50/10-NL sample at 22.58%. Density testing showed the smallest value in the CG40/50/10-L sample at 1.04 g/cm³ and the highest in the CG40/30/30-L sample at 1.28 g/cm³. The CG40/30/30-NL sample was the best, demonstrating an optimal balance between compressive strength, stable crystalline phases, low porosity, and high density.

Keywords: *cellular glass ceramic, basalt, geothermal silica, glass*

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN TEMPERATUR
PEMBAKARAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS*
CERAMIC BERBAHAN BASAL, SILIKA GEOTERMAL DAN KACA
MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

Oleh

DEVI MARISKA PUTRI

Sebagai Salah Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Lampung



**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

Judul Skripsi

: PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN
TEMPERATUR PEMBAKARAN TERHADAP
PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS*
CERAMIC BERBAHAN BASAL, SILIKA
GEOTERMAL DAN KACA MELALUI
METODE *DIRECT FOAMING*

Nama Mahasiswa

: **Devi Mariska Putri**

Nomor Pokok Mahasiswa

: 2017041025

Program Studi

: Fisika

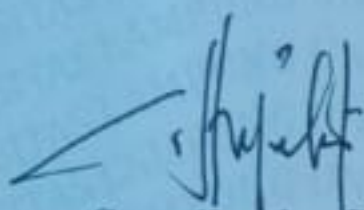
Fakultas

: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I



Suprihatin, S.Si., M.Si.

NIP. 197304141997022001

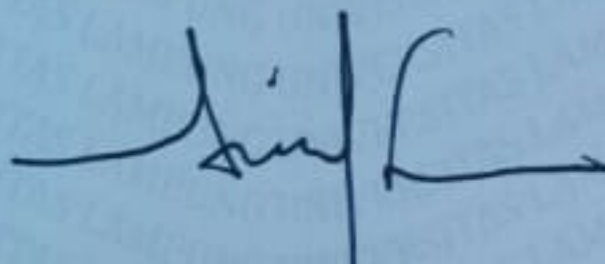
Pembimbing II



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

NIP. 198403192008011006

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA



Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng.

NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

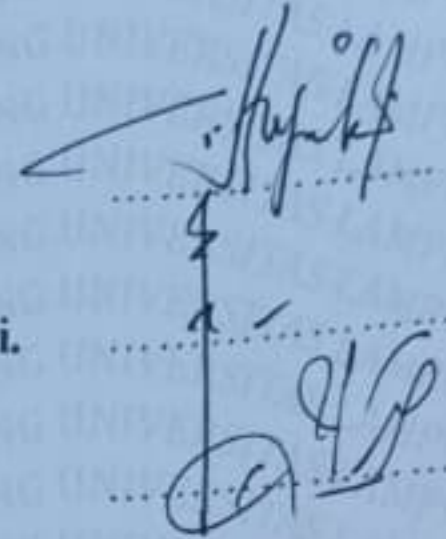
1. Tim Penguji

Ketua : Suprihatin, S.Si., M.Si.

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

Penguji bukan : Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.

Pembimbing



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam




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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 06 Agustus 2025

PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Mahasiswa : Devi Mariska Putri

Nomor Pokok Mahasiswa : 2017041025

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Perguruan Tinggi : Universitas Lampung

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa skripsi saya dengan judul **“Pengaruh Variasi Komposisi dan Temperatur Pembakaran terhadap Pembentukan Cellular Glass Ceramic Berbahan Basal, Silika Geotermal dan Kaca melalui Metode Direct Foaming”** adalah benar hasil karya sendiri, baik ide, hasil, maupun analisisnya. Selanjutnya saya tidak keberatan jika sebagian atau keseluruhan data di dalam skripsi digunakan oleh dosen atau program studi dalam kepentingan publikasi atas persetujuan penulis dan sepanjang nama saya disebutkan sebelum dilakukan publikasi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan penuh kesadaran untuk dapat digunakan sebagaimana mestinya.

Bandar Lampung, 06 Agustus 2025



Devi Mariska Putri
NPM. 2017041025

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Devi Mariska Putri, dilahirkan di Pringsewu pada tanggal 14 Mei 2002 sebagai anak keempat dari pasangan Alm. Bapak Fatkurozi dan Ibu Cik Darwanah.

Penulis memulai pendidikan di SD Negeri 2 Sinar Baru dan lulus pada tahun 2014. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 4 Pringsewu dan lulus pada tahun 2017, serta melanjutkan di SMA Negeri 2 Pringsewu dan lulus pada tahun 2020.

Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada Tahun 2020 melalui jalur SNMPTN. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PERUMDA Air Minum Way Rilau Kota Bandar Lampung pada Tahun 2023 dengan judul “Pengaruh Penggunaan *Zeolite* terhadap Perubahan Nilai *Total Dissolved Solid* (TDS) pada Air *Reservoir* Perusahaan Umum Daerah (PERUMDA) Air Minum Way Rilau Kota Bandar Lampung”. Selain itu, penulis juga telah mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Pesawaran, Kecamatan Pesawaran, Kabupaten Pesawaran.

Selama menempuh pendidikan, penulis aktif menjadi pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) di bidang Sains dan Teknologi pada tahun 2021-2022, Rohani Islam di bidang Kajian dan Keumatan pada tahun 2021-2022 dan Badan Eksekutif Mahasiswa FMIPA di Dinas Pemberdayaan Wanita pada tahun 2023-2024. Penulis juga aktif sebagai Asisten Praktikum Fisika Dasar pada tahun ajaran 2022/2023 dan sebagai *Research Assistant* di BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan pada tahun 2024-2025.

Penulis melakukan penelitian di *Pilot Plant Hidrometalurgi*, Pusat Riset Pertambangan (PRTP-BRIN) Tanjung Bintang, Lampung Selatan dengan judul “Pengaruh Variasi Komposisi dan Temperatur Pembakaran terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbahan Basal, Silika Geotermal dan Kaca melalui Metode *Direct Foaming*”.

MOTTO

“Sesungguhnya kemenangan itu bersama kesabaran, jalan keluar itu bersama kesulitan, dan sesudah kesulitan pasti akan datang kemudahan”

(HR. Tirmidzi)

“I have never been natural, all I do is try, try try”

(Taylor Swift)

“I learned from a lot of mistakes, so I decided to make more mistakes to learn more”

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini dipersembahkan

Kepada:

Kedua orang tuaku

Ibu Cik Darwanah dan Alm. Bapak Fatkurozi

Terima kasih atas do'a-do'a yang selalu mengiringi, dukungan tanpa henti, dan segala usaha tulus yang diberikan sepenuh hati, membimbingku dalam setiap langkah kehidupan.

Kakak-kakakku

Linda Wulandari, Dwi Yuliana & Dwi Yuliani

Terima kasih atas segala kasih sayang, dukungan, dan nasehat yang selalu diberikan.

Keluarga besar dan teman-teman

Terima kasih atas dukungan dan semangatnya yang tak pernah putus.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Segala puji bagi Allah SWT yang telah memberikan taufik dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **“Pengaruh Variasi Komposisi dan Temperatur Pembakaran terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbahan Basal, Silika Geotermal dan Kaca melalui Metode *Direct Foaming*”**. Dalam proses penyusunan skripsi ini, penulis menyadari bahwa banyak tantangan dan kendala yang harus dihadapi. Namun, berkat bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, penulis akhirnya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Untuk itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., IPM., ASEAN Eng. selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si. selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.
3. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Si., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung yang telah memberikan nasihat dan juga motivasi selama menempuh pendidikan di Jurusan Fisika.
4. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. selaku Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, saran, motivasi, ilmu dan nasihat kepada penulis selama penelitian dan proses penulisan skripsi.
5. Bapak David Candra Birawidha, S.T., M.Si. selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan bimbingan, saran, masukan dan arahan selama penelitian dan penulisan skripsi.
6. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku Pembahas yang telah memberikan saran dan masukan berharga, sehingga penulisan skripsi ini dapat menjadi lebih baik.
7. Bapak Drs. Syafriadi, M.Si selaku Dosen Pembimbing Akademik yang telah

memberikan bimbingannya selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Fisika.

8. Seluruh Dosen Jurusan Fisika yang telah memberikan ilmu dan pengalamannya selama penulis menjadi mahasiswa di Fisika FMIPA Universitas Lampung.
9. Seluruh staf Jurusan Fisika yang telah memberikan bantuan dalam berbagai urusan administrasi dan kebutuhan akademik selama penulis menempuh studi di Universitas Lampung.
10. Teman-teman seperjuangan, Irma Yulianti, Shinta Amalia Paradita, Mentari Kirana Nariswari, Ati laila Kamila dan Ika Winarti yang telah banyak membantu, menemani, memberikan semangat, serta menjadi teman berbagi suka dan duka selama penulis menyelesaikan studi.
11. Teman-teman di luar kampus: Nanda, Fitri, Lusia, Mila, Era, Prada dan Zahra yang selalu memberikan dukungan dan semangat.
12. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2020 dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT dapat membalas segala kebaikan dengan yang lebih baik dan mempermudah segala urusannya.

Bandar Lampung, 06 Agustus 2025

Devi Mariska Putri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	v
DAFTAR TABEL	vvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 <i>Cellular Glass Ceramic</i>	6
2.2 Batu Basal	7
2.3 Silika Geotermal	8
2.4 Kaca	9
2.5 Metode <i>Direct Foaming</i>	11
2.6 Poliuretan	11
2.7 Karakterisasi dan Uji.....	13
2.7.1 <i>Simultaneous Thermal Analysis</i> (STA).....	13
2.7.2 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	14
2.7.3 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	15
2.7.4 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	17
2.7.5 Kuat Tekan.....	18
2.7.6 Porositas.....	19
2.7.7 Densitas.....	20
III. METODE PENELITIAN	21
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	21
3.2.1 Alat.....	21
3.2.2 Bahan	21
3.3 Prosedur Penelitian	22
3.3.1 Preparasi Bahan	22
3.3.2 Pembuatan Sampel.....	22
3.3.3 Karakterisasi	24
3.3.4 Pengujian Sampel	25
3.4 Diagram Alir	25

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Karakterisasi Bahan	27
4.1.1 Hasil Karakterisasi Bahan menggunakan <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	27
4.1.2 Hasil Karakterisasi Bahan Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	28
4.2 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i>	32
4.2.1 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i> Menggunakan <i>Simultaneous Thermal Analysis</i> (STA)	32
4.2.2 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i> Menggunakan <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	34
4.2.3 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i> Menggunakan <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	36
4.2.4 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i> Menggunakan <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM).....	47
4.3 Hasil Pengujian <i>Cellular Glass Ceramic</i>	55
4.3.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Cellular Glass Ceramic</i>	55
4.3.2 Hasil Pengujian Porositas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	57
4.3.3 Hasil Pengujian Densitas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	59
V. KESIMPULAN DAN SARAN	62
5.1 Kesimpulan	62
5.2 Saran	63
DAFTAR PUSTAKA	64
LAMPIRAN.....	70

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. <i>Cellular glass ceramic</i>	6
2. Batu basal.....	7
3. Silika geotermal	9
4. Kaca.....	10
5. Poliuretan	12
6. Prinsip kerja XRF.....	15
7. Prinsip kerja XRD	16
8. Prinsip kerja SEM	18
9. Alat uji kuat tekan	19
10. Diagram perlakuan panas: (a) Linear, (b) Non-linear	24
11. Diagram alir penelitian.....	26
12. Hasil Karakterisasi XRD bahan baku basal, silika geotermal, dan kaca	29
13. Hasil karakterisasi STA CG40/10/50, CG40/30/30, dan CG40/50/10	33
14. Hasil karakterisasi XRD pada CG40/10/50, CG40/10/50-L, dan CG40/10/50-NL	37
15. Hasil karakterisasi XRD pada CG40/30/30, CG40/30/30-L, dan CG40/30/30-NL	40
16. Hasil karakterisasi XRD pada CG40/50/10, CG40/50/10-L, dan CG40/50/10-NL	43
17. Morfologi permukaan CG40/10/50-L: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	48
18. Morfologi permukaan CG40/30/30-L: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	48
19. Morfologi permukaan CG40/50/10-L: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	49

20. Morfologi permukaan CG40/10/50-NL: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	49
21. Morfologi permukaan CG40/30/30-NL: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	50
22. Morfologi permukaan CG40/50/10-N: (a) Makro, (b) SEM, (c) Grafik distribusi pori	50
23. Perbandingan hasil karakterisasi SEM pada: (a) CG40/10/50-L, (b) CG40/10/50-NL	53
24. Perbandingan hasil karakterisasi SEM pada: (a) CG40/30/30-L, (b) CG40/30/30-NL	53
25. Perbandingan hasil karakterisasi SEM pada: (a) CG40/50/10-L, (b) CG40/50/10-NL	53
26. Grafik hasil uji kuat tekan pada <i>cellular glass ceramic</i>	56
27. Grafik hasil uji porositas pada <i>cellular glass ceramic</i>	58
28. Grafik hasil uji densitas pada <i>cellular glass ceramic</i>	60

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kandungan mineral batu basal	8
2. Variasi komposisi dan temperatur <i>cellular glass ceramic</i>	23
3. Hasil Karakterisasi XRF basal, silika geotermal, dan kaca	28
4. Fasa XRD basal.....	30
5. Fasa XRD silika geotermal	31
6. Fasa XRD kaca.....	32
7. Hasil karakterisasi xrf <i>cellular glass ceramic</i> dengan perlakuan panas non-linear.....	35
8. Fasa XRD CG40/10/50	38
9. Fasa XRD CG40/10/50-L	39
10. Fasa XRD CG40/10/50-NL.....	39
11. Fasa XRD CG40/30/30	41
12. Fasa XRD CG40/30/30-L	41
13. Fasa XRD CG40/30/30-NL.....	42
14. Fasa XRD CG40/50/10	44
15. Fasa XRD CG40/50/10-L	45
16. Fasa XRD CG40/50/10-NL.....	45

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, industri konstruksi telah menghadapi tantangan besar karena pertumbuhan populasi global yang terus meningkat, yang sulit diimbangi dengan pasokan bahan konstruksi tradisional seperti semen, bata, dan kayu (Madurwar *et al.*, 2013). Namun, kemajuan signifikan dalam ilmu pengetahuan dan teknologi konstruksi terkait material bangunan telah menghasilkan inovasi terbaru, tidak hanya mencakup penciptaan teknologi atau bahan baru, tetapi juga pengembangan dan eksperimen dari material yang sudah ada (Fatriady *et al.*, 2021). Salah satu inovasi baru dalam bahan material dengan kualitas unggul adalah *cellular glass ceramic*, yang dirancang untuk mengatasi keterbatasan pasokan dan memenuhi kebutuhan konstruksi yang terus bertambah (Toncheva *et al.*, 2020).

Cellular glass ceramic memiliki sifat inert, tahan terhadap api, dan relatif kuat, sehingga biasanya digunakan sebagai isolator termal dalam konstruksi bangunan. Selain itu, *cellular glass ceramic* juga memiliki potensi yang besar dalam berbagai aplikasi, seperti penggunaan sebagai bahan ringan untuk mengisi lereng yang curam, sebagai lapisan drainase, dan sebagai agregat ringan dalam beton (Octaria *et al.*, 2016).

Cellular glass ceramic dapat dibuat menggunakan batu basal mengingat jumlahnya sangat melimpah di Indonesia. Di Provinsi Lampung, terdapat potensi batu basal yang dapat ditemukan di berbagai Kabupaten, dengan jumlah cadangan mencapai 336.510.000 ton (Widojoko dan Rajiman, 2011). Ketersediaan yang melimpah dari batu basal dapat dimanfaatkan untuk produksi material *cellular glass ceramic*.

Pemanfaatan limbah industri sebagai bahan keramik sudah banyak dilakukan, terutama yang dikombinasikan dengan basal. Namun, pemanfaatan limbah dari proses geotermal, seperti silika geotermal, masih jarang dimanfaatkan secara utuh tanpa pemurnian. Saat ini, limbah geotermal tanpa pemurnian hanya digunakan untuk pembuatan *paving block*. Padahal, limbah geodipa, yang berasal dari aktivitas industri geotermal, mengandung material mineral yang dapat digunakan sebagai substitusi semen dengan komposisi 30% hingga 50% dari total berat campuran. Hasil uji kuat tekan *paving block* menunjukkan bahwa penambahan limbah geodipa memberikan hasil yang lebih baik. Limbah ini mengandung silika dan alumina, yang bereaksi secara kimiawi dengan bahan lainnya untuk meningkatkan kekuatan material (Fikroni *et al.*, 2023).

Bahan lain yang dapat digunakan dalam pembuatan *cellular glass ceramic* adalah kaca. Kaca memiliki kandungan silika yang tinggi. Kandungan silika dalam kaca dapat dijadikan sebagai material pembuatan *cellular glass ceramic* karena memiliki kekuatan yang sangat tinggi, sifat tidak reaktif terhadap berbagai bahan kimia, tahan terhadap temperatur tinggi, dan juga tahan terhadap korosi (Soegijono *et al.*, 2019). Komposisi dominan kaca terdiri dari sekitar 65-73% SiO_2 , 14-18% Na_2O , dan 6-10% CaO . Kaca termasuk bahan yang tidak dapat terurai oleh mikroorganisme (*nonbiodegradable*) dan merupakan bahan utama dalam pembuatan *foam glass*. (Bhatty *et al.*, 2010).

Cellular glass ceramic dapat dibuat menggunakan metode *direct foaming*. *Direct foaming* adalah teknik yang pertama kali dikembangkan oleh Sundermann pada tahun 1973 untuk memproduksi bahan keramik berbusa. Dalam proses ini, bahan keramik dicampur dengan agen pembusa (*foaming agent*) organik atau anorganik, yang kemudian diaktifkan melalui perlakuan fisik atau kimia. Proses ini menghasilkan pembentukan gas yang mudah menguap dan gelembung-gelembung kecil, yang menciptakan struktur berpori dalam bahan keramik (Xia *et al.*, 2022). Metode *direct foaming* menawarkan beberapa keunggulan dibandingkan dengan teknik manufaktur lainnya, seperti tidak memerlukan *template* tambahan untuk membentuk struktur busa, tidak membutuhkan pembakaran bahan tambahan yang biasanya digunakan untuk membentuk pori-pori dan kemudian dihilangkan, serta

hanya menggunakan udara sebagai pembentuk pori, sehingga menghasilkan emisi limbah yang lebih rendah (Luthardt *et al.*, 2015).

Tulyaganov *et al.* (2016) melakukan penelitian dalam konteks produksi *cellular glass ceramic* dari kaca daur ulang dan upaya untuk mengubah karakteristiknya. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik *cellular glass ceramic* dengan mencampurkan 3-5% berat serbuk kaca aluminosilikat alkali tanah ke dalam campuran yang terdiri dari *cullet* kaca lembaran daur ulang dan serbuk SiC sebagai agen pembentuk gas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggabungan serbuk kaca aluminosilikat alkali tanah dalam jumlah tersebut dapat meningkatkan kemampuan sintering dan meningkatkan kekuatan tekan *cellular glass ceramic* hingga mencapai 2,07-2,60 MPa, sehingga membuatnya cocok untuk aplikasi struktural dan isolasi.

Sihombing *et al.* (2016) melakukan penelitian pembuatan *cellular glass ceramic* menggunakan limbah pecahan kaca dan *fly ash* dengan penambahan *dolomite* sebagai *foaming agent*. *Cellular glass ceramic* terbaik dihasilkan dari variasi *glass powder* 45 %wt, *fly ash* 50%wt dan *dolomite* 8 %wt. *Cellular glass ceramic* tersebut memiliki penyusutan sebesar 12,28%, densitas 1,041 g/cm³, porositas 58,73% dan kuat tekan sebesar 2,8777 MPa.

Selain itu, Marangoni *et al.*, (2014) melakukan penelitian terkait *cellular glass ceramic* dengan mencampurkan kaca dan basal *scoria*. Pembuatan busa dilakukan menggunakan *lime glass* sebagai bahan dasar untuk menciptakan gelembung busa, di mana gas yang dilepaskan selama pemanasan menciptakan struktur berpori dalam material. Variasi laju pemanasan selama sintering 10°C/menit, 20°C/menit, dan 40°C/menit. *Cellular glass ceramic* yang dihasilkan sangat berpori dengan sifat mekanik yang baik. *Cellular glass ceramic* yang dihasilkan juga menunjukkan sifat isolasi termal yang baik.

Dalam penelitian ini, dilakukan pembuatan *cellular glass ceramic* dengan variasi komposisi bahan baku dan temperatur pembakaran menggunakan metode *direct foaming*. Bahan baku yang digunakan adalah basal, silika geotermal, dan kaca dengan variasi komposisi 40%:10%:50%, 40%:30%:30%, dan 40%:50%:10%.

Temperatur pembakaran meliputi pendekatan linear (300°C, 700°C, dan 900°C) dan non-linear (300°C, 900°C, dan 700°C) yang telah ditentukan dari hasil karakterisasi *Simultaneous Thermal Analysis* (STA). Hasil sintesis dilakukan karakterisasi yang meliputi *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk menentukan struktur fasa yang terbentuk, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengamati morfologi *cellular glass ceramic* yang terbentuk. Pengujian sampel yang dilakukan yaitu uji uji mekanis (kuat tekan) serta fisis (porositas dan densitas).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana karakterisasi termal melalui STA dapat digunakan untuk menentukan temperatur pembakaran yang efisien dan optimal pada proses pembuatan *cellular glass ceramic*?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap komposisi kimia dan fasa yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* berdasarkan hasil karakterisasi XRF dan XRD?
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap morfologi yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* berdasarkan hasil karakterisasi SEM?
4. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap sifat mekanis (kuat tekan) dan sifat fisis (porositas dan densitas) pada *cellular glass ceramic*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui peran karakterisasi termal menggunakan STA dalam menentukan temperatur pembakaran optimal pada pembuatan *cellular glass ceramic*.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap

komposisi kimia dan fasa yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* berdasarkan hasil karakterisasi XRF dan XRD.

3. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap morfologi yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* berdasarkan hasil karakterisasi SEM.
4. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran terhadap sifat mekanis (kuat tekan) dan sifat fisis (porositas dan densitas) pada *cellular glass ceramic*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Batu basal yang digunakan berasal dari Mataram Baru, Lampung Timur.
2. Silika geotermal yang digunakan berasal dari PT Geo Dipa Energi Dieng.
3. Alkali aktivator (NaOH) yang digunakan sebanyak 3 M.
4. Poliuretan yang digunakan sebanyak 40% dari massa total.
5. Uji fisis dan mekanis yang dilakukan yaitu porositas, densitas, dan kuat tekan.
6. Karakterisasi yang digunakan STA, XRF, XRD, dan SEM.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan temperatur pembakaran pada pembuatan *cellular glass ceramic* berbasis basal, silika geotermal dan kaca.
2. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dalam bidang Fisika Material.
3. Sebagai referensi untuk penelitian pada bidang *cellular glass ceramic*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Cellular Glass Ceramic*

Perkembangan bahan berpori baru yang dihasilkan dari daur ulang limbah kaca mendapat perhatian besar dalam sektor konstruksi, terutama dalam hal sifat mekanis dan aplikasi struktural. *Cellular glass ceramic* adalah bahan berpori dengan porositas biasanya lebih dari 60% (Bernardo *et al.*, 2007). *Cellular glass ceramic* sangat dihargai karena ringan, memiliki kemampuan isolasi panas, dan kombinasi sifat mekanik yang baik. Selain itu, material ini tidak mudah terbakar dan tahan air, sehingga semakin dipertimbangkan untuk digunakan sebagai bahan pengisi ringan atau isolasi dalam rekayasa sipil (Marangoni *et al.*, 2014). *Cellular glass ceramic* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Cellular glass ceramic*

Berdasarkan struktur selnya, *cellular glass ceramic* dibagi menjadi dua jenis, yaitu sel tertutup (*closed cell*) dan sel terbuka (*open cell*). Jenis sel tertutup memiliki struktur seperti *foam* yang memiliki kekuatan tekan dan stabilitas dimensi yang lebih tinggi serta penyerapan air yang rendah, sehingga cocok digunakan sebagai bahan bangunan. Di sisi lain, jenis sel terbuka memiliki pori-pori yang saling

terhubung, yang memberikan kinerja penyerapan air yang lebih baik (Sunarya, 2011).

Produksi *cellular glass ceramic* menjadi salah satu solusi yang efektif untuk mengatasi permasalahan krisis pembuangan sampah dan polusi lingkungan, dan juga berkontribusi pada perkembangan teknologi energi terbarukan. Bahan inovatif ini berperan penting dalam mengatasi masalah lingkungan dan mendorong perkembangan energi yang berkelanjutan (Sihombing *et al.*, 2016).

2.2 Batu Basal

Batuan yang ditemukan di daerah perbukitan dikenal sebagai batu basal. Basal adalah batuan beku yang terbentuk melalui pendinginan magma yang memiliki komposisi basa, baik di permukaan atau dekat permukaan bumi (Tarmizi *et al.*, 2018). Batu basal berwarna hijau keabu-abuan, memiliki permukaan berlubang-lubang, dan tersusun dari kristal-kristal yang sangat kecil. Batu basal ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Batu basal

Batu basal mengandung sejumlah unsur mineral. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Sucipta dan Sadisun (2000), unsur-unsur mineral utama yang ada dalam batuan basal ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Kandungan mineral batu basal (Sucipta dan Sadisun, 2000)

Jenis Mineral	Persentase (%)
Silikat Plagioklas [(Na, Ca)AlSi ₃ O ₈]	40 - 65
Gelas Vulkanik [SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O, MgO, CaO, Na ₂ O, K ₂ O, H ₂ O]	5 - 35
Piroksen [(Ca,Na) (Mg, Fe, Al) (Si,Al) ₂ O ₆]	5 - 25
Olivin [(Mg, Fe) ₂ SiO ₄]	0 - 8
Hornblenda [[Ca ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ (OH) ₂ [(Si,Al) ₄ O ₁₁] ₂]	0 - 1

Batu basal memiliki berbagai kegunaan, seperti sebagai bahan konstruksi untuk bangunan dan pondasi (seperti gedung, jalan, jembatan, dan lainnya), serta sebagai agregat. Untuk memperoleh agregat dari batu basal, diperlukan suatu proses pengolahan material bahan galian yang disebut kominusi (*Size Reduction*). Kominusi merupakan salah satu tahap dalam pengolahan bahan galian yang bertujuan untuk mengurangi ukuran padatan tersebut melalui metode pemecahan, pemotongan, atau penggilingan. Tujuannya untuk mencapai ukuran yang diinginkan, sehingga mempermudah proses selanjutnya (Asis, 2018).

Ketersediaan yang melimpah dari batu basal dapat dimanfaatkan untuk produksi material *cellular glass ceramic*. Batu basal memiliki tingkat kekuatan tekan yang tinggi, sehingga cocok digunakan sebagai bahan dalam pembuatan *cellular glass ceramic*. Menggunakan batu basal dalam pembuatan *cellular glass ceramic* memberikan berbagai keunggulan, dan juga dapat meningkatkan nilai ekonomi dari batu basal itu sendiri (Kim *et al.*, 2020).

2.3 Silika Geotermal

Silika geotermal adalah komponen utama dari fluida geotermal yang sebagian besar terdiri dari silika (SiO₂). Silika ini biasanya ditemukan dalam bentuk larutan di dalam fluida panas bumi yang diambil dari *reservoir* geotermal. Ketika fluida tersebut mengalami pendinginan atau perubahan tekanan, silika mulai mengendap dan membentuk kerak pada permukaan pipa serta peralatan di pembangkit listrik tenaga panas bumi. Sebagai contoh, PT Geo Dipa Energi yang terletak di Dieng, Jawa Tengah, merupakan salah satu pabrik yang mengalami pembentukan kerak silika pada sistem pipa pembangkit tenaga listrik geotermal. Pengendapan silika

pada pipa produksi menyebabkan berkurangnya diameter pipa sehingga dapat mengurangi laju alir dan membuat pipa dapat tersumbat. Untuk mengatasi masalah ini, limbah silika yang dihasilkan dari pembersihan kerak dapat digunakan sebagai bahan untuk membuat *cellular glass ceramic*. Silika geotermal memiliki tingkat kandungan silika yang tinggi dan juga tingkat kandungan logam yang tinggi (Silviana, 2021). Silika geotermal ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Silika geotermal

Secara alami, silika terdapat dua bentuk utama, yaitu bentuk kristalin dan bentuk amorfus. Silika kristalin dapat ditemukan dalam tiga bentuk utama, seperti kuarsa, tridimit, dan kristobalit. Sementara itu, struktur amorfusnya dapat ditemukan dalam berbagai bentuk seperti opal, *flint*, kaca silika, *diatomaceous earth*, dan *vitreous silica* (Purnawan *et al.*, 2018). Silika memiliki kekuatan yang sangat tinggi, sifat tidak reaktif terhadap berbagai bahan kimia, tahan terhadap temperatur tinggi, dan juga ketahanan terhadap korosi (Soegijono *et al.*, 2019).

2.4 Kaca

Kaca merupakan substansi padat yang bening dan memiliki sifat transparan atau tembus pandang, umumnya cenderung rapuh. Jenis kaca yang paling sering digunakan selama berabad-abad adalah untuk jendela dan wadah minuman. Komposisi kaca terdiri sekitar 75% dari silikon dioksida (SiO_2), yang ditambahkan dengan Na_2O , CaO , dan beberapa bahan tambahan lainnya (Purnomo dan Hisyam, 2014). Kaca ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Kaca

Dari segi fisika, kaca dianggap sebagai zat cair yang sangat dingin. Istilah ini digunakan karena struktur partikel yang membentuknya tersebar cukup jauh, seperti yang terdapat dalam zat cair, meskipun kaca itu sendiri memiliki keadaan padat. Hal ini terjadi karena pendinginan yang sangat cepat, yang mencegah partikel-partikel silika untuk mengatur diri dengan susunan teratur. Dari segi kimia, kaca terdiri dari campuran berbagai oksida anorganik yang memiliki sifat tidak mudah menguap. Campuran ini dihasilkan melalui dekomposisi dan peleburan senyawa alkali, alkali tanah, pasir, dan unsur-unsur penyusun lainnya. Kaca memiliki karakteristik yang berbeda dari keramik lainnya, dan keunikannya terutama dipengaruhi oleh sifat khusus silika (SiO_2) dan proses-proses pembentukannya (Hastutiningrum, 2013).

Limbah kaca adalah jenis limbah yang dihasilkan dalam jumlah besar oleh masyarakat, terutama di kota-kota besar. Jumlah limbah kaca terus meningkat setiap harinya karena banyak aktivitas manusia yang menghasilkan kaca. Sebagian besar limbah kaca dibuang ke lahan terbuka tanpa proses daur ulang. Hal ini memiliki dampak negatif pada lingkungan karena kaca adalah bahan yang tidak dapat terurai secara alami oleh alam (Pulungan, 2021). Untuk itu, diperlukan langkah-langkah inovatif guna mengurangi penumpukan limbah kaca, dan salah satu pendekatan yang dapat diambil adalah dengan menggunakan limbah kaca sebagai salah satu material campuran untuk *cellular glass ceramic* (Kusno, 2023).

2.5 Metode *Direct Foaming*

Direct foaming adalah metode pembuatan material berbusa di mana gas atau *foaming agent* ditambahkan langsung ke dalam bahan cair atau semi-cair untuk membentuk gelembung. Proses ini melibatkan pencampuran bahan dasar dengan partikel kecil dan kemudian memperkenalkan gas atau reaktan kimia yang menghasilkan gas saat terkena temperatur atau tekanan tertentu, menghasilkan struktur berbusa yang stabil setelah material mengeras (Kim *et al.*, 2019).

Dalam teknik *direct foaming*, suspensi keramik dibuat berpori dengan cara mengenalkan gas (baik melalui proses pembusaan fisik atau kimiawi); setelah itu, busa basah tersebut dijaga agar tetap stabil, kemudian dikeringkan dan disinter. *Direct foaming* menghasilkan fleksibilitas tinggi dalam hal komposisi kimia dan penyesuaian mikrostruktur akhir. Salah satu tantangan utama dalam teknik ini adalah stabilisasi busa basah, yang harus dilakukan dengan hati-hati untuk mencegah kerusakan struktur. Busa basah adalah sistem yang tidak stabil secara termodinamika, di mana proses seperti aliran fase cair dan pembesaran gelembung gas dapat menyebabkan degradasi dan kerusakan busa (Barg, 2008).

Direct foaming memungkinkan kontrol yang baik terhadap ukuran dan distribusi pori dalam *cellular glass ceramic*. Metode ini menghasilkan struktur berpori yang konsisten dan porositas yang seragam. Selain itu, *direct foaming* relatif sederhana dibandingkan dengan teknik lain dan tidak memerlukan teknologi yang sangat kompleks. Hal ini dapat mengurangi biaya produksi dan waktu pemrosesan. Teknik ini juga dapat memperbaiki kinerja material dengan meningkatkan keterhubungan pori. Struktur pori yang terkontrol dengan baik secara signifikan dapat meningkatkan sifat fungsional dari *cellular glass ceramic* (Leng *et al.*, 2022).

2.6 Poliuretan

Poliuretan adalah sebuah polimer yang memiliki gugus fungsi uretan ($-NHCOO-$) dalam struktur utamanya. Gugus fungsi uretan terbentuk melalui reaksi antara senyawa yang mengandung gugus hidroksil ($-OH$), yang umumnya disebut sebagai

poliol, dengan senyawa yang mengandung gugus isosianat (-NCO-) (Rohaeti *et al.*, 2003). Pembentukan polioliol dalam poliuretan melibatkan reaksi hidroksilasi yang terdiri dari dua tahap, yakni pembentukan cincin epoksida (oksiran) dalam reaksi epoksidasi dan reaksi pembukaan cincin oksiran (Neswati *et al.*, 2019). Poliuretan dalam kemasan ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Poliuretan

Proses sintesis *polyurethane foam* (PUF) melibatkan dua reaksi pokok, yaitu reaksi pembentukan gel dan pembentukan busa. Reaksi pembentukan gel terkait dengan pembentukan ikatan yang timbul akibat reaksi antara isosianat dan gugus hidroksil. Reaksi pembentukan busa adalah suatu proses yang mengakibatkan pembentukan gelembung udara yang terperangkap dalam campuran yang sedang mengalami reaksi. Munculnya gelembung udara bisa disebabkan oleh zat pembentuk busa (*blowing agent*), yang terdiri dari dua jenis, yaitu zat pembentuk busa secara fisika dan kimia. Pembentukan busa secara fisika terjadi melalui proses penguapan ketika struktur seluler terpapar panas. Sedangkan pembentukan busa secara kimia terjadi ketika air atau senyawa lain bereaksi dengan isosianat dan menghasilkan gas karbon dioksida (CO_2) (Neswati *et al.*, 2019).

Pembuatan busa poliuretan dilakukan melalui metode *one-shot process*, yang digunakan untuk menghasilkan berbagai jenis busa, baik yang fleksibel maupun yang kaku. Dalam proses ini, komponen berupa isosianat dicampur dengan komponen yang terdiri dari campuran polioliol, *blowing agent*, katalis, serta surfaktan. Busa poliuretan yang dihasilkan kemudian diuji karakteristiknya dengan mengukur daya serap air dan menganalisis densitas *bulk* (Triwulandari *et al.*, 2014).

2.7 Karakterisasi dan Uji

2.7.1 *Simultaneous Thermal Analysis* (STA)

Simultaneous Thermal Analysis (STA) adalah teknik analisis termal yang menggabungkan dua metode penting, yaitu *Thermogravimetric Analysis* (TGA) dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dalam satu instrumen untuk mengukur perubahan massa dan aliran panas secara bersamaan pada sampel. Gabungan kedua metode ini memberikan gambaran komprehensif tentang perilaku termal material, sangat berguna untuk karakterisasi material secara mendalam. STA banyak digunakan dalam berbagai industri untuk mengevaluasi sifat termal material, seperti stabilitas termal, komposisi, dan mekanisme degradasi bahan (Homa *et al.*, 2020). Prinsip dasar STA melibatkan pengukuran dua parameter utama: perubahan massa dan perubahan panas pada sampel yang dipanaskan dalam atmosfer terkendali. TGA mengukur perubahan massa seiring kenaikan suhu atau waktu, memberikan informasi tentang kandungan air, pelarut, dan stabilitas termal material. Sedangkan DSC mengukur aliran panas yang diperlukan untuk mempertahankan suhu sampel pada nilai yang sama dengan suhu referensi, memberikan informasi tentang transisi fasa, titik leleh, serta reaksi endotermik atau eksotermik (Losic *et al.*, 2024).

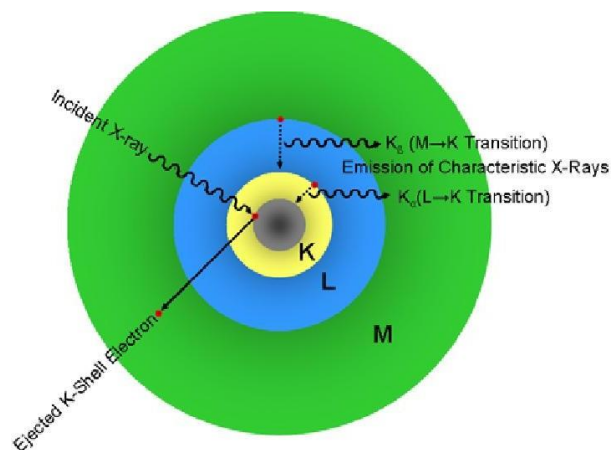
STA digunakan secara luas dalam berbagai bidang, seperti material polimer, komposit, bahan bakar biomassa, dan material kayu. Dalam material polimer, STA menilai stabilitas termal, suhu degradasi, dan mengidentifikasi komponen volatil dalam polimer. Sebagai contoh, dalam pengembangan bahan polimer baru, STA memberikan informasi penting tentang suhu degradasi polimer dan perilaku termalnya selama pemanasan (Albert dan Liew, 2025). Pada material komposit, STA digunakan untuk menentukan kandungan karbon, oksigen, dan residu anorganik, serta memverifikasi keaslian material seperti *graphene*. STA juga membantu memahami mekanisme degradasi dan stabilitas termal komposit yang digunakan dalam aplikasi suhu tinggi, seperti otomotif atau kedirgantaraan (Farivar *et al.*, 2021). Pada bahan bakar biomassa, STA mengevaluasi kestabilan termal dan mekanisme degradasi selama pirolisis, memberikan gambaran mengenai

dekomposisi biomassa pada suhu tinggi dan komponen yang terlepas (Mercurio *et al.*, 2022). Di bidang material kayu, STA menilai dampak perlakuan terhadap kestabilan termal dan degradasi kayu, penting untuk industri pengolahan kayu dan produk berbasis biomassa untuk energi terbarukan (Leroy *et al.*, 2008).

2.7.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

XRF adalah alat yang digunakan untuk menganalisis komposisi kimia dan konsentrasi unsur-unsur dalam suatu sampel melalui metode spektrometri (Ramdani *et al.*, 2023). Teknik XRF menganalisis sinar-X yang dipancarkan dari material sebagai hasil tumbukan antara sinar-X dari tabung sinar-X dengan material sampel. Analisis XRF merupakan contoh analisis yang didasarkan pada perilaku atom yang terkena radiasi. Interaksi atom dengan cahaya dapat menyebabkan berbagai fenomena tergantung pada intensitas cahaya yang berinteraksi dengan atom tersebut. Ketika material berinteraksi dengan cahaya berenergi tinggi (seperti sinar-X), hal ini dapat menyebabkan elektron pada tingkat energi terendah dalam atom terlempar keluar. Akibatnya, atom menjadi tidak stabil sehingga elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi (kulit valensi) akan mengisi posisi kosong yang ditinggalkan oleh elektron yang terlempar. Proses pengisian posisi elektron pada kulit valensi yang lebih rendah ini disebut deeksitasi. Deeksitasi disertai dengan pemancaran cahaya berenergi lebih rendah daripada energi yang menyebabkan eksitasi elektron. Cahaya yang dipancarkan ini disebut radiasi fluoresensi (Setiabudi *et al.*, 2012).

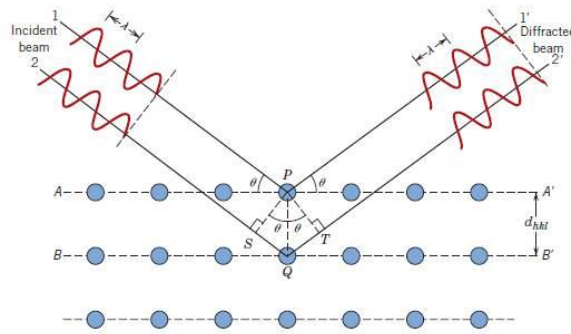
Radiasi fluoresensi memiliki energi yang khas tergantung pada elektron yang tereksitasi dan terdeeksitasi pada atom dalam material. Karakteristik khas dari radiasi fluoresensi pada setiap unsur memungkinkan analisis kualitatif untuk mengidentifikasi unsur-unsur yang berbeda. Sementara itu, analisis kuantitatif untuk menentukan konsentrasi unsur yang dianalisis dapat ditentukan berdasarkan intensitas radiasi fluoresensi yang dipancarkan (Setiabudi *et al.*, 2012). Prinsip kerja XRF ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Prinsip kerja XRF (Atmodjo *et al.*, 2013)

2.7.3 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) atau difraksi sinar-X adalah metode analisis yang memanfaatkan interaksi antara sinar-X dan atom-atom yang tersusun dalam sistem kristal. Analisis XRD digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan suatu senyawa dengan mengamati pola pembiasan cahaya yang dihasilkan dari sinar yang dibiaskan oleh material dengan susunan atom dalam kisi kristalnya. Secara sederhana, prinsip kerja XRD dapat dijelaskan melalui interaksi antara sinar-X dan susunan atom dalam kisi kristal. Setiap senyawa terdiri dari susunan atom yang membentuk bidang tertentu. Jika sebuah bidang memiliki bentuk tertentu, maka foton yang datang dengan sudut tertentu hanya akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan yang khas. Dengan kata lain, foton yang datang pada sudut tertentu pada bidang dengan bentuk tertentu tidak akan menghasilkan pola pantulan atau pembiasan yang bervariasi. Sebagai analogi, bayangan sebuah objek akan membentuk pola yang sama jika cahaya datang dari sudut yang sama. Kekhasan pola difraksi inilah yang menjadi dasar analisis kualitatif untuk membedakan satu senyawa dari yang lain menggunakan instrumen XRD. Prinsip kerja XRD ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip kerja XRD (Callister dan Rethwisch, 2010)

Gambar 2.7 menunjukkan bahwa sinar pertama datang dan mengenai titik pada bidang kristal pertama, kemudian dihamburkan oleh atom P. Sinar kedua datang dan menumbuk bidang kristal berikutnya, lalu dihamburkan oleh atom Q. Jika kedua sinar tersebut sejajar dan memiliki fase yang saling menguatkan, maka jarak tambahan yang ditempuh oleh sinar kedua, yaitu $SQ + QT$, harus merupakan kelipatan dari panjang gelombang, sehingga persamaan yang diperoleh adalah:

$$n\lambda = SQ + QT \quad (2.1)$$

$$\sin \theta = \frac{SQ}{PQ} = \frac{SQ}{d_{hkl}} \quad (2.2)$$

$$d_{hkl} \sin \theta = SQ \quad (2.3)$$

$$n\lambda = 2SQ \quad (2.4)$$

$$d_{hkl} \sin \theta = SQ \quad (2.5)$$

$$d_{hkl} \sin \theta = \frac{1}{2} n\lambda \quad (2.6)$$

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.7)$$

Keterangan:

λ = Panjang gelombang sinar-X (m)

d_{hkl} = Jarak antar bidang (Å)

θ = Sudut difraksi (°).

Perumusan matematis mengenai proses difraksi yang terjadi akibat interaksi antara sinar-X yang dipantulkan oleh material disebut hukum Bragg. Pantulan ini terjadi

tanpa kehilangan energi, sehingga menghasilkan pantulan elastis atau *elastic scattering*. Bragg menunjukkan bahwa bidang yang mengandung atom-atom dalam kristal akan memantulkan radiasi dengan cara yang sama seperti pemantulan cahaya pada cermin. Ketika sinar datang mengenai bidang yang tersusun paralel dan berjarak d satu sama lain, ada kemungkinan sinar-sinar yang datang akan dipantulkan kembali oleh bidang tersebut dan saling berinterferensi secara konstruktif, sehingga memperkuat sinar pantul dan menyebabkan terjadinya difraksi (Setiabudi *et al.*, 2012).

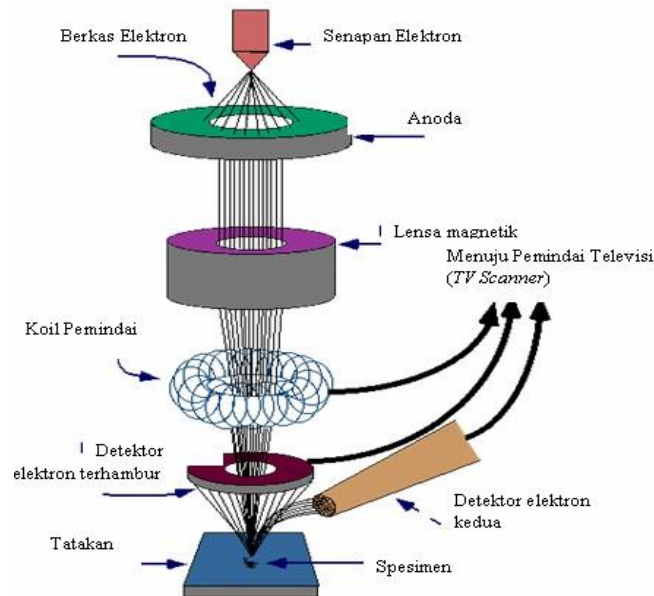
2.7.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah jenis mikroskop elektron yang digunakan untuk mengamati permukaan citra suatu bahan. Selain itu, SEM juga dapat memberikan informasi mengenai komposisi kimia dari bahan tersebut, baik untuk bahan konduktif maupun non-konduktif. Fungsi utama SEM meliputi penyediaan informasi mengenai topografi, yaitu karakteristik permukaan dan teksturnya; morfologi, yaitu bentuk dan ukuran partikel penyusun objek; komposisi, yaitu data semi-kuantitatif tentang unsur dan senyawa yang terkandung dalam objek; serta informasi kristalografi, yaitu bagaimana susunan butir-butir di dalam objek yang diamati (Siswati, 2022).

Deteksi sinyal pada SEM melibatkan identifikasi *secondary electron* (SE) dan *backscattered electron* (BSE). Ketika berkas elektron dengan energi tinggi mengenai sampel, akan terjadi hamburan elastik dan tidak elastik. Hamburan elastik menghasilkan BSE, yaitu elektron yang dipantulkan oleh atom-atom dalam sampel. Sebaliknya, hamburan tidak elastik menghasilkan SE. Umumnya, BSE dipantulkan dengan sudut besar dan kehilangan energi minimal, sementara SE dipantulkan dengan sudut kecil dan memiliki energi yang lebih rendah dibandingkan elektron yang datang (Sani, 2019).

Dalam hamburan tidak elastik, elektron yang datang akan mentransfer energi kinetik ke elektron dalam sampel. Elektron dalam atom sampel yang memiliki energi kinetik cukup besar akibat menyerap energi tumbukan tersebut akan keluar dari sampel dan menjadi elektron sekunder. Biasanya, elektron sekunder ini

memiliki energi antara 3 eV hingga 5 eV. Sinyal dari deteksi SE digunakan untuk analisis topografi, sedangkan BSE digunakan untuk menentukan komposisi unsur dalam sampel (Sani, 2019). Prinsip kerja SEM ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Prinsip kerja SEM (Sutanto dan Nurhasanah, 2012)

2.7.5 Kuat Tekan

Uji kuat tekan digunakan untuk menentukan kekuatan material saat dikenai gaya. Uji kuat tekan sangat penting untuk mengetahui kekuatan bahan beton atau logam yang akan mengalami tekanan atau kompresi dalam penggunaannya. Pengujian kuat tekan secara umum menggunakan standar (ASTM C-305-82, 2001) berdasarkan rumus perhitungan pada Persamaan (2.10).

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.8)$$

Keterangan:

P = Kuat tekan material (MPa)

F = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang material (mm²).

Proses pembebanan tekan pada material bertujuan untuk mengetahui sejauh mana kekuatan tekan yang dapat ditahan oleh bahan tersebut, sehingga dapat dipahami

batas wajar pembebanannya (Hadi, 2016). Alat uji kuat tekan ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Alat uji kuat tekan

Proses uji kuat tekan dilakukan dengan memberikan gaya tekan pada material uji hingga material tersebut retak atau patah. Setelah pengujian selesai, data analisis mengenai struktur dan kekuatan material akan ditampilkan dalam bentuk grafik di layar monitor mesin uji. Berdasarkan data tersebut, dapat diketahui nilai kekuatan tekan material serta standar kekuatan yang berlaku untuk benda tersebut (Sani, 2021).

2.7.6 Porositas

Porositas adalah ukuran ruang kosong yang terdapat diantara material, dan merupakan perbandingan volume ruang kosong terhadap total volume, dengan nilai antara 0 sampai 1, atau dalam persentase antara 0-100%. Porositas dipengaruhi oleh jenis bahan, ukuran bahan, distribusi pori, sementasi, riwayat diagenetik, dan komposisi material tersebut (Mulyono, 2021). Menurut ASTM-C 642-06 nilai porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.9).

$$\varphi = \frac{m_b - m_k}{m_b - m_a} \times 100\% \quad (2.9)$$

Keterangan:

φ = Porositas (%)

m_k = Massa material kering (g)

m_b = Massa material setelah direndam (g),

m_a = Massa material ditimbang dalam air (g).

2.7.7 Densitas

Densitas atau massa jenis adalah perbandingan antara massa dan volume suatu material. Material dengan densitas tinggi memiliki kerapatan massa yang besar. Massa jenis mengukur massa per satuan volume material. Semakin tinggi massa jenis suatu material, semakin besar massa per volume-nya.

Pengukuran densitas penting dalam berbagai bidang ilmu dan industri, seperti teknik material, geologi, dan konstruksi, karena mempengaruhi sifat dan aplikasi suatu material. Untuk menentukan nilai densitas, dapat dilakukan dengan membagi massa dengan volume material (Syukri, 2020). Menurut ASTM-C 642-06 nilai densitas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.10).

$$\rho = \frac{m_k}{m_b - m_a} \times \rho_{air} \quad (2.10)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis (g/cm³)

ρ_{air} = Massa jenis air (1 g/cm³)

m_k = Massa material kering (g)

m_b = Massa material setelah direndam (g)

m_a = Massa material ditimbang dalam air (g).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan November 2024 sampai Februari 2025 di Laboratorium Non Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan (BRIN) Lampung, Jl. Sutami KM 15 Tanjung Bintang Lampung Selatan; 0721-350055.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan antara lain: *muffle furnace* 1400°C merk *Naberthem* yang berfungsi untuk membakar atau memanaskan sampel, *ballmill* tipe TR6-Z-A-D112.M4 yang berfungsi untuk menghancurkan bahan yang keras seperti basal dan kaca, mortar, alu, ayakan 325 mesh ASTM:E11 *Nakatama Scientific*, oven merk *Cosmo* tipe Co-9926 RCG, gelas plastik, mesin uji kuat tekan merk *Universal Testing Machines* (UTM) *made in Thailand* tipe HT-2402, timbangan digital merk *Gold series ohaus*, mesin *polishing* merk *Struers* tipe *Tegramin-25*, STA 509 *Jupiter* merk NETZSCH, XRF *PANalytic* tipe: Minipal 4, XRD *PANalytical* tipe: *E'xpertPro* dan SEM tipe: *quattro thermo scientific*.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu: batu basal, silika geotermal, kaca, *waterglass*, NaOH, aquades, resin, katalis, poliuretan A (poliol) dan B (isosianat).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan: preparasi bahan, pembuatan sampel, pengujian sampel dan karakterisasi sampel.

3.3.1 Preparasi Bahan

Tahapan preparasi bahan sebagai berikut:

1. Batu basal, silika geotermal dan kaca dihancurkan dengan *ballmill* selama 3 jam.
2. Batu basal, silika geotermal dan kaca disaring dengan ayakan 325 mesh.
3. Serbuk basal, silika geotermal dan kaca 325 mesh ditimbang masing-masing 1 g untuk dikarakterisasi awal menggunakan XRF dan XRD.

3.3.2 Pembuatan Sampel

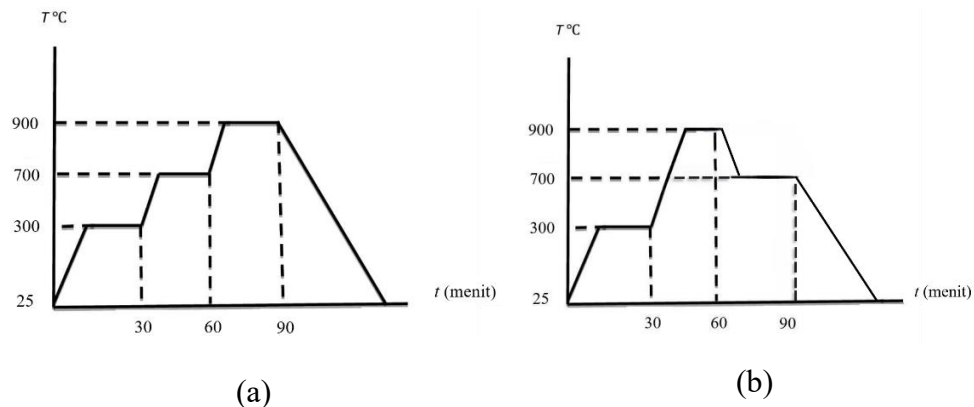
Tahapan pembuatan sampel *cellular glass ceramic* sebagai berikut:

1. Basal, silika geotermal, dan kaca ditimbang 32 g sesuai dengan Tabel 3.1. Untuk memudahkan penyajian data, sampel diberi kode yang terdiri dari format: *cellular glass ceramic* (CG), variasi komposisi basal, variasi komposisi silika geotermal, variasi komposisi kaca, dan temperatur pembakaran. Contohnya, kode sampel CG40/10/50 berarti *cellular glass ceramic* memiliki kandungan basal sebanyak 40%, silika geotermal sebesar 10%, kaca sebesar 50% tanpa melalui proses pembakaran, kode sampel CG40/10/50-L berarti *cellular glass ceramic* memiliki kandungan basal sebanyak 40%, silika geotermal sebesar 10%, kaca sebesar 50%, dan temperatur pembakaran 300°C, 700°C, dan 900°C (linear) dengan penahanan selama 30 menit pada setiap temperatur. Sementara itu, kode sampel CG40/10/50-NL berarti *cellular glass ceramic* memiliki kandungan basal sebesar 40%, silika geotermal sebesar 10%, kaca sebesar 50%, dan temperatur pembakaran 300°C, 900°C, dan 700°C (non-linear) dengan penahanan selama 30 menit pada setiap temperatur.

Tabel 3.1 Variasi komposisi dan temperatur *cellular glass ceramic*

No.	Kode sampel	Komposisi (%wt)			Temperatur pembakaran (°C)
		Basal	Silika geotermal	Kaca	
1	CG40/10/50	40	10	50	-
2	CG40/10/50-L	40	10	50	300, 700, 900
3	CG40/10/50-NL	40	10	50	300, 900, 700
4	CG40/30/30	40	30	30	-
5	CG40/30/30-L	40	30	30	300, 700, 900
6	CG40/30/30-NL	40	30	30	300, 900, 700
7	CG40/50/10	40	50	10	-
8	CG40/50/10-L	40	50	10	300, 700, 900
9	CG40/50/10-NL	40	10	50	300, 900, 700

2. Campuran serbuk basal, silika geotermal, dan kaca diaduk selama ± 3 menit.
3. NaOH 3 M dan *waterglass* ditimbang sebanyak 26,7g dengan perbandingan 1:2, kemudian diaduk selama ± 3 menit
4. Padatan (serbuk basal, silika geotermal, dan kaca) dan cairan (NaOH 3 M dan *waterglass*) diaduk hingga homogen selama ± 3 menit.
5. Poliuretan A dan B ditimbang dengan perbandingan 1:1 sebanyak 40% dari massa total 58,7 g.
6. Campuran padatan dan cairan ditambahkan dengan poliuretan A dan diaduk hingga homogen selama ± 1 menit
7. Sebanyak 50% poliuretan B dimasukkan dalam wadah berbentuk tabung dengan ukuran tinggi 12 cm dan diameter 3 cm, kemudian ditambahkan campuran bahan.
8. Sisa 50% poliuretan B ditambahkan dan diaduk hingga homogen selama ± 20 detik.
9. Sampel dibiarkan pada temperatur ruang selama 5 hari kemudian dilepaskan dari cetakan.
10. Sampel dikeringkan dalam oven pada temperatur 80°C selama 4 jam lalu dipotong menjadi 3 bagian.
11. Sampel dipanaskan dalam *furnace* menggunakan variasi temperatur pembakaran seperti pada Tabel 3.1, dengan penahanan selama 30 menit pada setiap variasi dan didinginkan dalam *furnace* hingga mencapai temperatur kamar, kemudian dikeluarkan dari *furnace*.



Gambar 3.1 Diagram perlakuan panas: (a) Linear, (b) Non-linear

3.3.3 Karakterisasi

Sampel *cellular glass ceramic* dikarakterisasi menggunakan STA 509 *Jupiter* merk NETZSCH, *XRF PanAnalytical Type minipal 4*, *XRD PanAnalytical type expertpro*, dan SEM Quattro S.

1) *Simultaneous Thermal Analysis* (STA)

Langkah-langkah karakterisasi STA pada *cellular glass ceramic* sebagai berikut:

- Sampel dihaluskan menggunakan mortar.
- Sampel yang sudah halus ditimbang sebanyak 2 g.
- Sampel dikarakterisasi menggunakan STA.

2) *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *X-Ray Diffraction* (XRD)

Langkah-langkah karakterisasi XRF dan XRD pada *cellular glass ceramic* sebagai berikut:

- Sampel dihaluskan menggunakan mortar.
- Sampel yang sudah halus disaring menggunakan ayakan ukuran 325 mesh.
- Sampel ditimbang sebanyak 2 g.
- Sampel dikarakterisasi menggunakan XRF dan XRD

3) *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Langkah-langkah karakterisasi SEM pada *cellular glass ceramic* sebagai berikut:

- Setiap sampel di-*mounting* menggunakan bahan resin dan katalis.

- b. Sampel di-*polishing* menggunakan mesin *polish* dari *grid* 800, 1000, hingga 1200 untuk mendapatkan permukaan *cellular glass ceramic* yang mengkilap.
- c. Semua sampel dikarakterisasi menggunakan SEM.

3.3.4 Pengujian Sampel

1. Pengujian kuat tekan

Pengujian kuat tekan pada *cellular glass ceramic* dilakukan untuk mendapatkan beban tekan maksimum yang bisa diterima oleh sampel. Prosedur pengujian dilakukan sesuai dengan SNI 15-2094-2000 sebagai berikut:

- a. Sampel diletakkan secara simetris pada mesin uji kuat tekan.
- b. Saat uji kuat tekan berlangsung, beban tekan maksimum yang diterima oleh sampel diamati dan dicatat, yaitu ketika *dial* tidak naik lagi atau saat sampel sudah hancur (P).
- c. Kuat tekan dihitung dengan Persamaan (2.8).

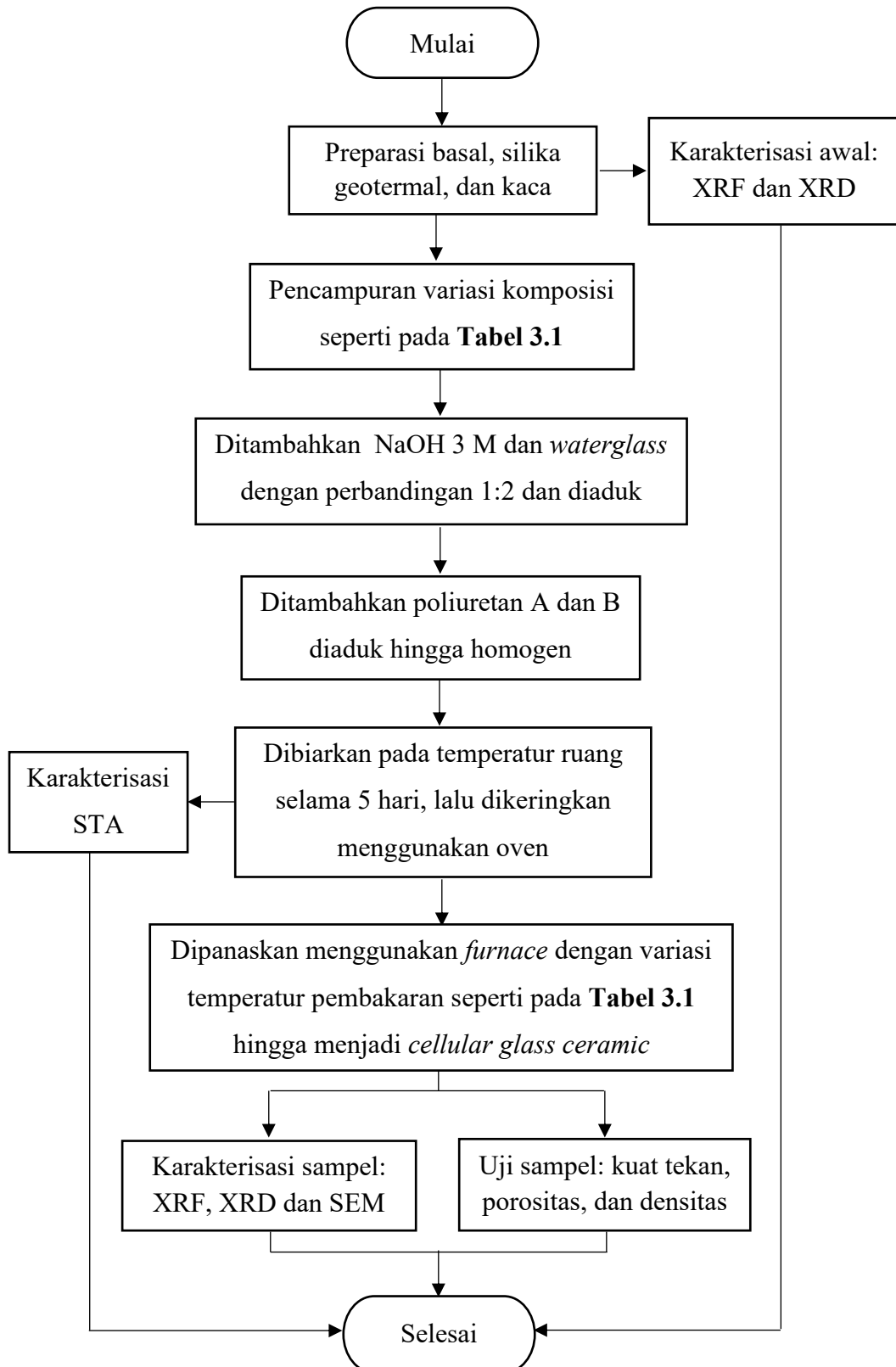
2. Pengujian porositas dan densitas

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

- a. Massa sampel dalam keadaan kering ditimbang dan dicatat menggunakan timbangan digital (m_k).
- b. Sampel direndam dalam air selama 24 jam.
- c. Permukaan sampel yang berisi air diusap menggunakan kain lap, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital dan dicatat massa sampel setelah direndam dalam air (m_b).
- d. Sampel ditimbang kembali dalam keadaan digantung dalam air (m_a), dan dihitung porositas dan densitas menggunakan Persamaan (2.9) dan (2.10).

3.4 Diagram Alir

Diagram alir dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.2 Diagram alir penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Berdasarkan hasil karakterisasi STA, temperatur optimal dalam pembakaran *cellular glass ceramic* berada pada rentang 300, 700 dan 900°C.
2. Berdasarkan hasil karakterisasi XRF, komposisi kimia utama dari *cellular glass ceramic* adalah SiO₂, Fe₂O₃, dan CaO. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan bahwa fasa yang paling dominan terbentuk pada *cellular glass ceramic* *anorthite*, *albite*, dan *diopside*.
3. Berdasarkan hasil karakterisasi SEM, sampel *cellular glass ceramic* CG40/10/50NL memiliki rata-rata ukuran pori terkecil, dengan 70% pori berukuran kurang dari 5 mm. Sementara itu, sampel CG40/50/10NL memiliki rata-rata ukuran pori terbesar, dengan sekitar 50% pori berukuran lebih dari 5 mm.

Cellular glass ceramic dengan sampel CG40/30/30-NL memiliki nilai kuat tekan tertinggi sebesar 2,76 MPa, sementara nilai terendah terdapat pada sampel CG40/50/10-L dengan 1,36 MPa. Porositas tertinggi dicapai oleh CG40/50/10-NL sebesar 22,58%, sedangkan porositas terendah terdapat pada CG40/30/30-NL sebesar 9,77%. Nilai densitas tertinggi ditemukan pada CG40/30/30-L sebesar 1,28 g/cm³, sedangkan densitas terendah pada sampel CG40/50/10-L sebesar 1,04 g/cm³.

4. Dari seluruh hasil karakterisasi dan pengujian, CG40/30/30-NL adalah sampel terbaik karena menunjukkan keseimbangan optimal antara kuat tekan, fasa kristalin yang stabil, porositas rendah, dan densitas tinggi.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang dapat diberikan untuk penelitian selanjutnya ialah dalam usaha untuk menghasilkan *cellular glass ceramic* dengan kualitas yang lebih baik, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut menggunakan variasi pola pemanasan yang lebih beragam, seperti pengaturan temperatur bertahap kecil atau *multi-step heating*, untuk menemukan kombinasi yang lebih optimal dalam mengontrol distribusi pori dan stabilitas struktur *cellular glass ceramic*.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbasi, S., Mirkazemi, S.M., Ziaee, M., Heydari, S. 2014. The Effects of Fe_2O_3 and Co_3O_4 on Microstructure and Properties of Foam Glass from Soda Lime Waste Glasses. *Glass Physics and Chemistry*. 40(2): 173-179.
- Akbar, I., Nugraha, I., dan Rahmad, A. 2016. Pembuatan Cellular Glass dari Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Teknologi Kimia dan Industri*. 5(2): 21–26.
- Albert, C. M., dan Liew, K. C. 2025. A review on the role of thermogravimetric analysis in assessing thermal stability and degradation of wood. *Wood Science and Technology*. 59(1): 55.
- Asis, S. 2018. Pengaruh Waktu Penggilingan Menggunakan *Ball Mill* terhadap Ukuran Partikel Batuan Basalt. *Jurnal Dintek*. 11(1): 13-17.
- Atmodjo, D. P., Suryana, D. dan Wibowo, H. 2013. Pengujian Unjuk Kerja Sample Holder XRF Epsilon 5. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*, Bandung.
- Barg, S., Soltmann, W. C., Andrade, M., Koch, D. and Grathwohl, G. 2008. Cellular Ceramics by Direct Foaming of Emulsified Ceramic Powder Suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*. 91(9): 2823–2829.
- Bahtiar. 2015. Pengaruh komposisi abu sabuk kelapa dan arang batok kelapa terhadap densitas dan kekerasan keramik lantai yang divitrifikasi. *Skripsi*. Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar. Makassar.
- Bernardo, E., Cedro, R., Florean, M. dan Hreglich, S. 2007. Reutilization and Stabilization of Wastes by the Production of Glass Foams. *Ceramic International*. 33(6): 963–968.
- Bhatty, M. B., Saadet, M. dan Saeed, M. T. 2010. Development of Foam Glass As A New Insulating Building Material. *Glass Ceramic*. 38: 15-14.
- Borhan, A. I., Gromada, M., Nedelcu, G. G. dan Leontie, L. 2016. Influence of (CoO, CaO, B₂O₃) Additives on Thermal and Dielectric Properties of BaO–Al₂O₃–SiO₂ Glass–Ceramic Sealant for OTM Applications. *Ceramics International*. 42(8): 10459-10468.

- Candra, D., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Amin, M. dan Al Muttaqii, M. 2020. 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): 86-94.
- Callister, W. D. dan Rethwisch, D.G. 2010. *Materials Science and Engineering: an Introduction*. John Wiley and Son. Canada.
- Chou, I. M. 1987. Phase Relations in the System NaCl-KCl-H₂O. III: Solubilities of Halite in Vapor-Saturated Liquids Above 445° C and Redetermination of Phase Equilibrium Properties in the System NaCl-H₂O to 1000 C and 1500 bars. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 51(7): 1965-1975.
- Dávalos, J., Bonilla, A., Villaquirán-Caicedo, M. A., de Gutiérrez, R. M., dan Rincón, J. M. 2021. Preparation of Glass–Ceramic Materials from Coal Ash and Rice Husk Ash: Microstructural, Physical and Mechanical Properties. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. 60(3): 183-193.
- Davidson, P. M., Lindsley, D. H. dan Carlson, W. D. 1988. Thermochemistry of Pyroxenes on the Join Mg₂Si₂O₆-CaMgSi₂O₆; a Revision of the Model for Pressures up to 30 kbar. *American Mineralogist*. 73(11-12): 1264-1266.
- Dehghani, P. Dan Soleimani, F. 2021. Effect of *Cristobalite* Content on Physical, Dielectric Constant, and Bending Strength of Fused Silica Ceramics Formed by Slip Casting Method. *Advanced Ceramics Progress*. 7(2):16-22.
- Farivar, F., Lay Yap, P., Karunagaran, R. U., dan Losic, D. 2021. Thermogravimetric Analysis (TGA) of Graphene Materials: Effect of Particle Size of Graphene, Graphene Oxide and Graphite on Thermal Parameters. *Journal of Carbon Research*. 7(2): 41.
- Fatriady, Rachman, R., Jamal, M., Muliawan, I. W., Mustika, W., Mabui, D. S. S. Tumpu, M., Mansyur, Irianto, dan Masdiana. 2021. *Teknologi Bangunan dan Material*. Toharmedia. Makassar.
- Fikroni, Juara, A. dan Suharto. 2023. Environmentally Friendly Paving Block Innovation by Utilizing Geodipa. *Civil Engineering Study*. 3(2): 14-23.
- Gimenez-Carbo, E., Soriano, L., Roig-Flores, M. dan Serna, P. 2021. Characterization of Glass Powder from Glass Recycling Process Waste and Preliminary Testing. *Materials*. 14(11): 2971.
- Guo, R., Takasu, H., Funayama, S., Shinoda, Y., Tajika, M., Harada, T., dan Kato, Y. 2022. Mechanical Stability and Heat Transfer Improvement of Cao-Based Composite Pellets for Thermochemical Energy Storage. *Chemical Engineering Science*. 255: 117674.
- Hadi, S. 2016. *Teknologi Bahan*. Andi. Yogyakarta.

- Hastutiningrum, S. 2013. Proses Pembuatan Batu Bata Berpori dari Tanah Liat dan Kaca. *Jurnal Teknologi Technoscientia*. 5(2): 200-206.
- Homa, M., Sobczak, N., Hodor, K., dan Gezgin, S. 2020. Simultaneous Differential Thermal Analysis and Thermogravimetric Analysis of Si-30B Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*. 29(11): 7073–7079.
- Kim, I. J., Park, J. G., Han, Y. H., Kim, S. Y., dan Shackelford, J. F. 2019. Wet foam stability from colloidal suspension to porous ceramics: a review. *Journal of the Korean Ceramic Society*. 56(3), 211-232.
- Kim, E., Kim, K. dan Song, O. 2020. Properties of Basalt-Fiber Reinforced Foam Glass. *Journal of Asian Ceramic Societies*. 8(1): 170–175.
- Kusno, I. 2023. Sintesis dan karakteristik foam glass-ceramic berbahan baku limbah padat abu terbang batubara, limbah kaca dan batuan basal *Disertasi*. Universitas Lampung. Lampung.
- Leng, Q., Yao, D., Xia, Y., Liang, H. dan Zeng, Y.-P. 2022. Microstructure and Permeability of Porous Zirconia Ceramic Foams Prepared Via Direct Foaming with Mixed Surfactants. *Journal of the European Ceramic Society*. 42(16): 7528-7537.
- Leroy, V., Cancellieri, D., dan Leoni, E. 2008. Thermal degradation of ligno-cellulosic fuels: DSC and TGA studies. *Thermochimica Acta*. 451(1-2):131-138
- Li, X., Zang, X., Xing, X., Li, J., Ma, Y., dan Li, T. 2022. Effect of Fe₂O₃ on the Crystallization Behavior of Glass-Ceramics Produced from Secondary Nickel Slag. *Metals*. 12(1): 164.
- Liu, J., Zhang, Z., Xu, S., dan Wang, X. 2018. Effect of Porosity on Mechanical Properties of Porous Ceramics Prepared by Different Methods. *Ceramics International*. 44(14): 17182-17189.
- Liu, R., Guo, Y., Li, H., Chang, Z., Lu, H., dan Wang, S. 2025. Preparation and Characterization of CaO-Al₂O₃-SiO₂ Glass–Ceramic Microspheres from Coal-Based Solid Waste. *Silicon*. 17(7): 1593-1600.
- Losic, D., Farivar, F., dan Yap, P. L. 2024. Refining and Validating Thermogravimetric Analysis (TGA) for Robust Characterization and Quality Assurance of Graphene-Related Two-Dimensional Materials (GR2Ms). *Journal of Carbon Research*. 10(2): 30.

- Luthardt, F., Adler, J. dan Michaeli, A. 2015. Characteristics of a continuous direct foaming technique. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. 12(S3): 133–138.
- Macdonald, G. J. F. 1956. Quartz-Coesite Stability Relations at High Temperatures and Pressures. *American Journal of Science*. 254: 713-721.
- Madurwar, M. V., Ralegaonkar, R. V. dan Mandavgane, S. A. 2013. Application of Agro-Waste for Sustainable Construction Materials. *A Review, Construction and Building Materials*. 38(1): 872-878.
- Marangoni, M., Secco, M., Parisatto, M., Artioli, G., Bernardo, E., Colombo, P., Altasi, H., Binmajed, M. dan Binhussain, M. 2014. Cellular Glass–Ceramics from a Self Foaming Mixture of Glass and Basalt Scoria. *Journal of Non-Crystalline Solids*. 403: 38-46.
- Mercurio, M., Izzo, F., Langella, A., dan Sarkar, B. (2022). Simultaneous Thermal Analysis (STA): A Powerful Tool for Forensic Investigation of Geomaterials. *In Mineralogical Analysis Applied to Forensics*. 193–224.
- Muchlisa dan Ekandini, P. 2008. *Super Pintar Ilmu Pengetahuan Alam*. Grasindo. Jakarta.
- Mulyono, T. 2021. *Bahan Bangunan dan Konstruksi*. Stiletto Book. Yogyakarta.
- Neswati, Novizar, Arief, F. dan Yusniwati. 2019. Sintesis, Karakterisasi dan Modifikasi Busa Poliuretan Fleksibel Berbahan Baku Biopoliol Berbasis Minyak Kelapa Sawit dan Minyak Nabati Lainnya: Sebuah Review. *Jurnal Agroindustri*. 9(2): 66-82.
- Octaria, L., Fadli, A. dan Bahrudin. 2016. Pengaruh Suhu dan Waku Sintering terhadap Pembuatan *Foam Glass* Menggunakan Limbah Pecahan Kaca dan Abu Terbang (*Fly Ash*) dari Pabrik Sawit. *JOM FTEKNIK*. 3(1):1-6.
- Pambudi, N. A., Itoi, R., Yamashiro, R., Alam, B. Y. C. S., Tusara, L., Jalilinasrabad, S. dan Khasani, J. 2015. The Behavior of Silica in Geothermal Brine from Dieng Geothermal Power Plant, Indonesia. *Geothermics*. 54:109-114.
- Prostakova, V., Shishin, D., Shevchenko, M., dan Jak, E. 2019. Thermodynamic Optimization of the $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--FeO--Fe}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ Oxide System. *Calphad*. 67:101680.
- Pulungan, A. H. 2021. Pengaruh Penambahan Serbuk Kaca dan *Superplasticizer* Sika *Viscocrete* 3115 N terhadap Kuat Tarik dan Penyerapan Beton. *Skripsi*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara. Medan.

- Purnawan, C., Martini, T. dan Rini, I. P. 2018. Sintesis dan Karakterisasi Silika Abu Ampas Tebu Termodifikasi Arginin sebagai Adsorben Ion Logam Cu (II). *Jurnal Penelitian Kimia*. 14(2): 333–348.
- Purnomo, H. dan Hisyam, E. S. 2014. Pemanfaatan Serbuk Kaca sebagai Substitusi Parsial Semen pada Campuran Beton Ditinjau dari Kekuatan Tekan dan Kekuatan Tarik Belah Beton. *Jurnal Fropil*. 2(1): 45-55.
- Ramdani, N., Mustam, M. dan Azis, H. A. 2023. *Bahan Ajar Kimia Instrumentasi*. Omera Pustaka. Banyumas.
- Rohaeti, E., Surdia, N. M., Radiman, C. L. dan Ratnaningsih, E. 2003. Pengaruh Jenis Polioliol terhadap Pembentukan Poliuretan dari Monomer PEG400 dan MDI. *Prosiding ITB Sains dan Teknologi*. 35(2): 97-109.
- Rusiyanto, R., Meiartha, R., Fitriyana, D. F., Sudiyono, S., Setiadi, R., Siregar, J. P., dan Ansori, C. 2024. Effect of Firing Heating Rate on the Density, Porosity, Vickers Hardness and Microstructure of the Crucible Specimens. Momentum. *Physics Education Journal*. 20(1): 49–55.
- Sani, R. A. 2021. *Karakterisasi Material*. Bumi Aksara. Jakarta.
- Scheffler, M., dan Colombo, P. 2006. *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*. John Wiley and Sons. New Jersey.
- Setiabudi, A., Hardian, R. Dan Mudzakir, A. 2012. *Karakterisasi Material; Prinsip dan Aplikasinya dalam Penelitian Kimia*. UPI PRESS. Bandung.
- Siagian, H. dan Hutabalian, M. 2012. Studi Pembuatan Keramik Berpori Berbasis Clay dan Kaolin Alam dengan Aditif Abu Sekam Padi. *Jurnal Saintika*. 12(1): 15-22.
- Sihombing, A. J., Fadli, A. dan Bahrudin. 2016. Pembuatan *Foam Glass* Menggunakan Limbah Pecahan Kaca dan Abu Terbang (*Fly Ash*) dari Pabrik Sawit. *JOM FTEKNIK*. 3(1): 1-7.
- Silviana. 2021. *Silika dan Pemanfaatannya*. Andi. Yogyakarta.
- Siswati, B. H. 2022. *E-Modul Biologi Dasar Berbasis STEM*. PT Teguh Ikhyak Properti Seduluran. Mojokerto.
- Soegijono, B., Susetyo, F. B. dan Notonegoro, H. A. 2019. Perilaku Ketahanan Korosi Komposit Coating Poliuretan/Silika/ Karbon pada Baja Karbon Rendah. *Jurnal Teknik Mesin Untirta*. (5)1: 57 – 59.
- Sunarya, Y. 2011. *Kimia Dasar 2 Berdasarkan Prinsip-Prinsip Kimia Terkini*. Yrama Widya. Bandung.

- Sucipta, I. B. E. dan Sadisun, I. A. 2000. Studi Petrografi Batuan Vulkanik sebagai Agregat Bahan Baku Beton. *Buletin Geologi*. 32(3): 145-157.
- Sutanto, H. dan Nurhasanah, I. 2012. *Teknologi Lapisan Tipis dan Aplikasinya*. UPT UNDIP. Semarang.
- Sutcu, M., dan Akkurt, S. 2009. The Use of Recycled Paper Processing Residues in Making Porous Brick with Reduced Thermal Conductivity. *Ceramics International*. 35(7): 2625–2631.
- Syukri, M. 2020. *Pengantar Geofisika*. Syiah Kuala University Press. Banda Aceh.
- Tarmizi, Saleh, S.M. dan Isya, M. 2018. Pengaruh Substitusi Semen Portland dan Fly Ash Batubara pada Filler Abu Batu terhadap Asphalt Concrete-Binder Course (AC-BC). *Jurnal Teknik Sipil*. 1(3): 749 – 760.
- Toncheva, K., Lakov, L. dan Jivov, B. 2020. Project of an Experimental Plant for the Production of Plates and Granules of Foam Glass and Composite Material on This Basis. *Science. Business. Society*. 5(3): 104-107.
- Triwulandari, E., Astrini, N. dan Haryono, A. 2014. Pembuatan Polioliol Berbasis Komponen Minyak Sawit Sebagai Bahan Baku Busa Poliuretan. *Jurnal Sains Materi Indonesia*. 16(1): 43-48.
- Tulyaganov, D. U., Fernandes, H. R., Agathopoulos, S. dan Ferreira, J. M. F. 2006. Preparation and Characterization of High Compressive Strength Foams from Sheet Glass J. *Porous Mater*. 13: 133–139.
- Widjojoko, L. dan Rajiman. 2011. Kinerja Mortar Abu Batu Basalt Scoria dengan Menggunakan Semen Serbaguna Baturaja dan Superplasticiser Structuro 335. *Jurnal Teknik Sipil Bandar Lampung*. 2(1): 79-87.
- Xia, F., Cui, S. dan Pu, X. 2022. Performance Study of Foam Ceramics Prepared by Direct Foaming Method Using Red Mud and K-Feldspar Washed Waste. *Ceramics International*. 48(4): 5197-5203.
- Xie, C., Gui, Y., Song, C., & Hu, B. 2016. Effect of CaO/SiO₂ and Heat Treatment on the Microstructure of Glass-Ceramics from Blast Furnace Slag. *Ceramics – Silikáty*. 60(2): 146-151.
- Zhou, X., Qian, X., Wu, M., Huang, Y., Zhou, C., Tang, L., Xu, L., Wang, L. dan Wu, C. 2024. Combining Molten Glass with High-Melting-Point Ceramics for Ultra-High Temperature Protection in Sensors. *Composites Part B: Engineering*. 292(112102): 1-11.