

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN DURASI PENGGILINGAN
BAHAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS* BERBASIS
BASALT ROCK MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

(Skripsi)

Oleh

Fidhea Pinaring Gusti

1957041012



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

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN DURASI PENGGILINGAN BAHAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS* BERBASIS *BASALT ROCK* MELALUI METODE *DIRECT FOAMING*

Oleh

Fidhea Pinaring Gusti

Cellular glass merupakan material insulasi ringan berbasis alumina silikat yang memiliki sifat tahan air, api, dan suhu ekstrem. Namun, optimalisasi komposisi bahan baku dan proses pembuatannya masih menjadi tantangan. Penelitian ini penting karena mengusung pendekatan berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber daya alam lokal seperti batu basal yang kaya silika, serta limbah industri berupa *fly ash* dan *slag boiler*. Penelitian ini bertujuan mengembangkan *cellular glass* melalui metode *direct foaming*, menggunakan *polyurethane foam* sebagai pembusa dan proses sintering pada suhu 950°C. Variasi komposisi basal (25%, 50%, 75%) dan durasi penggilingan (30, 60, 90, dan 120 menit) diuji untuk mengetahui pengaruhnya terhadap struktur mikro, fasa kristalin, dan sifat fisik-mekanik material. Analisis dilakukan menggunakan XRF, XRD, dan SEM. Hasil menunjukkan bahwa komposisi basal 75% dengan penggilingan 120 menit menghasilkan *cellular glass* terbaik, dengan densitas 0,962 g/cm³ dan kuat tekan 7,603 MPa. Kandungan silika tinggi menghasilkan fasa kristalin dominan seperti cristobalite dan quartz. Sebaliknya, porositas tertinggi (19,15%) ditemukan pada komposisi basal 25% dan penggilingan 30 menit. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan insulasi termal ramah lingkungan berbasis material lokal dan limbah industri.

Kata kunci:

Material ringan, cellular glass, direct foaming, basalt powder, slag boiler

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF VARIATIONS IN COMPOSITION AND GRINDING DURATION ON THE FORMATION OF BASALT ROCK- BASED CELLULAR GLASS USING THE DIRECT FOAMING METHOD

by

Fidhea Pinaring Gusti

Cellular glass is a lightweight insulation material based on aluminosilicate that possesses water, fire, and extreme temperature resistance. However, optimizing the raw material composition and manufacturing process remains a challenge. This research is significant as it adopts a sustainable approach by utilizing local natural resources such as silica-rich basal rock, along with industrial waste like fly ash and boiler slag. The study aims to develop cellular glass using the direct foaming method, employing polyurethane foam as the foaming agent and a sintering process at 950°C. Variations in basalt composition (25%, 50%, 75%) and milling duration (30, 60, 90, and 120 minutes) were tested to observe their effects on the material's microstructure, crystalline phases, and physical-mechanical properties. Analyses were conducted using XRF, XRD, and SEM. Results showed that a 75% basal composition with 120 minutes of milling produced the best cellular glass, with a density of 0.962 g/cm³ and compressive strength of 7,603 MPa. The high silica content led to dominant crystalline phases such as cristobalite and quartz. Conversely, the highest porosity (19.15%) was found in the 25% basalt composition with 30 minutes of milling. This research contributes to the development of environmentally friendly thermal insulation based on local materials and industrial waste.

Keywords:

Lightweight material, cellular glass, direct foaming, basalt powder, slag boiler

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN DURASI PENGGILINGAN
BAHAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS* BERBASIS
BASALT ROCK MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

Oleh

FIDHEA PINARING GUSTI

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika

**Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung**



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

Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Pembentukan *Cellular Glass* Berbasis *Basalt Rock* Melalui Metode *Direct Foaming*

Nama Mahasiswa : **Fidhea Pinaring Gusti**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1957041012

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Suprihatin, S.Si., M.Si.

NIP. 197304141997022001

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

NIP. 198403192008011006

2. Ketua Jurusan Fisika

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

NIP. 197109092000121001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

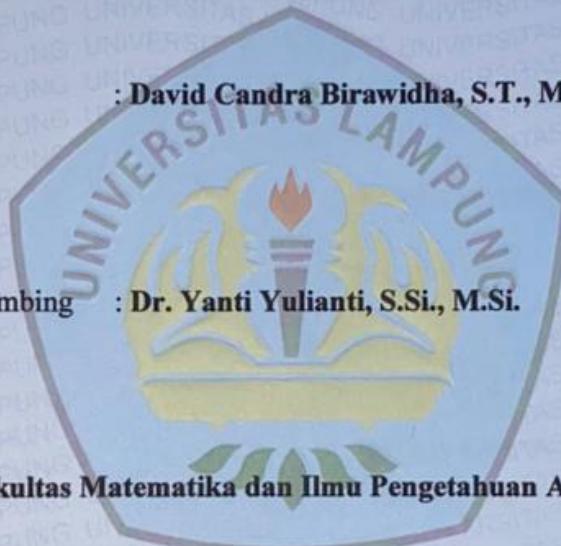
: Suprihatin, S.Si., M.Si.

Sekretaris

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

Penguji

Bukan Pembimbing : Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

NIP. 197110012005011002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 01 Desember 2025

PERNYATAAN

Dengan ini penulis menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh penulis dan tidak terdapat karya orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Apabila ada pernyataan yang tidak benar, maka penulis bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 01 Desember 2025



Fidhea Pinaring Gusti

1957041012

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Fidhea Pinaring Gusti, dilahirkan di Wachyuni Mandira pada tanggal 25 Desember 2000. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara, dari pasangan Bapak Tri Joko Saputro dan Ibu Heni Listyowati. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD Al-Azhar 2 Bandar Lampung pada tahun 2013, MTsN 2 Bandar Lampung pada tahun 2016, dan MAN Insan Cendekia Jambi pada tahun 2019. Penulis melanjutkan jenjang pendidikan tinggi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019.

Selama menjalani Pendidikan tinggi, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT Bukit Asam dengan judul laporan **“Ketelusuran Nilai Kemiringan Boom Shiploader di PT Bukit Asam Pelabuhan Tarahan sebagai Penerapan Aplikatif dari Bandul Sederhana”** pada tahun 2022. Penulis juga melakukan pengabdian kepada masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2023 di Desa Talang Padang, Kecamatan Talang Padang, Tanggamus. Selain itu, penulis juga menyelesaikan penelitian skripsi di Jurusan Fisika dengan judul **“Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Pembentukan Cellular Glass Berbasis Basalt Rock Melalui Metode Direct Foaming”**.

Penulis pernah bergabung di *International Office* Unila menjadi *student buddy* pada tahun 2022. Selain itu, penulis juga terlibat dalam penilaian akreditasi internasional Jurusan Fisika sebagai *student representative* pada tahun 2023 dan pada tahun yang sama, penulis juga tergabung sebagai mahasiswa magang Humas Unila *Batch 1* sebagai reporter.

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)

PERSEMBAHAN

Bismillahirrahmanirrahim

**Dengan penuh rasa syukur, cinta, dan mengharapkan ridho Allah SWT dan
syafaat Nabi Muhammad SAW**

karya ini dipersembahkan kepada kedua orang tuaku tercinta:

Tri Joko Saputra

dan

Heny Listyowati

Terimakasih atas segala do'a, dukungan, perjuangan dan kehangatan yang
membuat penulis mampu menyelesaikan Pendidikan S1.

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 dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Pembentukan *Cellular Glass* Berbasis *Basalt Rock* 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, 01 Desember 2025

Fidhea Pinaring Gusti

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 dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Pembentukan Cellular Glass Berbasis Basalt Rock Melalui Metode Direct Foaming”**. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga, waktu maupun pikiran. Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada:

1. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., sebagai Pembimbing Utama yang telah memberi arahan, masukan, 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. Ibu Dr. Yanti Yulianti, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Penguji yang telah mengoreksi dan memberikan masukan dalam penyelesaian skripsi ini;
4. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si. sebagai Dosen Pembimbing Akademik yang telah membantu, membimbing, dan memberi dukungan terhadap penulis;
5. Seluruh Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu dan pengalamannya yang telah diberikan dan seluruh staff Jurusan Fisika yang telah membantu memenuhi kebutuhan administrasi penulis.
6. Teman-teman seperjuangan: Shinta, Bianca, Annisa, Mela, Miranti, Feby, Diah, Ocha, Yuli, Razka, dan Asrizal yang sudah membersamai dan menjadi teman diskusi di segala persiapan menuju kelulusan.

7. Teman-teman dari Ikatan Duta Bahasa Provinsi Lampung, Magang Humas *batch 1*, mahasiswa asing Unila, dan semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu persatu, yang telah mendukung penulis secara moril dalam penyelesaian karya ini.

Akhir kata, penulis haturkan do'a dan panjatkan rasa syukur kepada Allah SWT, semoga Allah SWT memberikan imbalan yang berlipat atas bantuan semua pihak dan semoga selalu dimudahkan langkah kita yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.

Bandar Lampung, 01 Desember 2025

Penulis,

Fidhea Pinaring Gusti

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN.....	ix
KATA PENGANTAR.....	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Masalah	3
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Cellular Glass</i>	4
2.2 <i>Fly Ash</i>	6
2.3 Basal Scoria.....	7

2.4 Alkali Aktivator.....	9
2.5 Metode <i>Direct Foaming</i>	10
2.6 Uji Fisik dan Mekanik	12
2.6.1 Densitas.....	12
2.6.2 Porositas.....	13
2.6.3 Kuat Tekan.....	13
2.7 Karakterisasi dengan Sinar-X.....	14
2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)	15
2.7.2 X-Ray Flourescence (XRF).....	16
2.8 Scanning Electron Microscopy (SEM)	18

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	20
3.2.1 Alat penelitian.....	20
3.2.2 Bahan Penelitian	20
3.3 Prosedur Penelitian.....	21
3.3.1 Karakterisasi Bahan	21
3.3.2 Pembuatan Sampel.....	21
3.3.3 Uji Fisik dan Uji Mekanik Sampel	23
3.3.4 Karakterisasi Sampel	24
3.4 Diagram Alir	25

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Karakterisasi Bahan Pembuatan <i>Cellular Glass</i>	31
4.1.1 Hasil Karakterisasi X-Ray Fluorescence (XRF) Basal, <i>Fly Ash</i> , dan <i>Slag Boiler</i>	31
4.1.2 Hasil Karakterisasi X-Ray Diffraction (XRD) Basal, <i>Fly Ash</i> , dan <i>Slag Boiler</i>	31
4.2 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Kandungan Senyawa Kimia, Fasa Kristalin, dan Struktur Mikro <i>Cellular Glass</i>	35
4.2.1 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Kandungan Senyawa Kimia <i>Cellular Glass</i>	35

4.2.2 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Fasa Kristalin <i>Cellular Glass</i>	36
4.2.3 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Struktur Mikro <i>Cellular Glass</i>	41
4.3 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Sifat Fisik dan Mekanik <i>Cellular Glass</i>	46
4.3.1 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Densitas <i>Cellular Glass</i>	46
4.3.2 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Porositas <i>Cellular Glass</i>	48
4.3.3 Pengaruh Variasi Komposisi dan Durasi Penggilingan Bahan terhadap Kuat Tekan <i>Cellular Glass</i>	49
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	51
5.2 Saran	52
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Cellular Glass</i>	4
Gambar 2.2 Jenis-jenis <i>fly ash</i> : (a) <i>high-calcium</i> dan (b) <i>low-calcium</i>	6
Gambar 2.3 Basal scoria.....	8
Gambar 2.4 Struktur mikro yang diperoleh dengan metode: (a) replika; (b) penghilangan bahan pembentuk pori; dan (c) <i>direct foaming</i>	10
Gambar 2.5 Distribusi ruang kosong pada material.	13
Gambar 2.6 Komponen pada tabung sinar-X	14
Gambar 2.7 Difraksi sinar-X oleh sebuah kristal	15
Gambar 2.8 Skema optik sinar-X pada XRF.....	17
Gambar 2.9 Prinsip dasar SEM	18
Gambar 3.1 Diagram alir karakterisasi bahan	25
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sampel basal 25%.....	26
Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan sampel basal 50%.....	27
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan sampel basal 75%.....	28
Gambar 3.5 Diagram alir uji fisik dan uji mekanik	29
Gambar 3.6 Diagram alir karakterisasi <i>cellular glass</i>	30
Gambar 4.1 Difraktogram (a) basal, (b) <i>fly ash</i> , dan (c) <i>slag boiler</i>	33
Gambar 4.2 Difraktogram <i>cellular glass</i> komposisi basal 25% pada penggilingan (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit.	37
Gambar 4.3 Difraktogram <i>cellular glass</i> komposisi basal 50% pada penggilingan (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit.	38
Gambar 4.4 Difraktogram <i>cellular glass</i> komposisi basal 75% pada penggilingan (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit.	39
Gambar 4.5 Permukaan <i>cellular glass</i> komposisi basal 25% pada penggilingan bahan: (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit... ..	41

Gambar 4.6 Permukaan <i>cellular glass</i> komposisi basal 50% pada penggilingan bahan: (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit...	42
Gambar 4.7 Permukaan <i>cellular glass</i> komposisi basal 75% pada penggilingan bahan: (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit...	43
Gambar 4.8 Persebaran ukuran partikel pada variasi basal 75% pada penggilingan (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit.....	44
Gambar 4.9 Persebaran pori <i>cellular glass</i> pada penggilingan (a) 30 menit, (b) 60 menit, (c) 90 menit, dan (d) 120 menit.....	45
Gambar 4.10 Nilai densitas <i>cellular glass</i>	47
Gambar 4.11 Nilai porositas <i>cellular glass</i>	48
Gambar 4.12 Nilai kuat tekan sampel <i>cellular glass</i> berdasarkan persentase komposisi basal pada penggilingan 120 menit.	50

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1 Variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan	22
Tabel 4.1 Hasil karakterisasi XRF bahan penyusun <i>cellular glass</i>	32
Tabel 4.2 Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass</i> kompisisi basal 25%	35
Tabel 4.3 Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass</i> komposisi basal 50%	36
Tabel 4.4 Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass</i> komposisi basal 75%	36

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemilihan *cellular glass* sebagai material ringan dalam upaya mencapai pembangunan berkelanjutan menjadi salah satu strategi industri yang bertanggung jawab mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan. *Cellular glass* didefinisikan sebagai material insulasi ringan berpori, berbasis alumina silikat dengan karakteristik ringan (*lightweight*), kaku (*rigid*), dan ketahanan tinggi (*high durability*). *Cellular glass* banyak dimanfaatkan karena kemampuannya menahan tekanan beban berat, tahan korosi, tahan air, tahan api serta tahan panas dan dingin. Metode produksi *cellular glass* memanfaatkan perlakuan panas pada suhu tinggi dari campuran serbuk limbah kaca, bahan pembusa, dan bahan aditif (seperti *waterglass*). Campuran bahan dan pelepasan termal dari gas yang dihasilkan oleh bahan pembusa menyebabkan gelembung terperangkap dalam media kental sehingga terbentuk struktur seluler (Barczewski dkk., 2020).

Pembuatan *cellular glass* pada dasarnya memanfaatkan kandungan silika yang dapat ditemui pada batu basal. Silika pada batu basal terbukti meningkatkan kuat tekan material dan pengembangan kalsium silikat hidrat (C-S-H) sehingga menyempurnakan pori-pori karena pada dasarnya basal adalah jenis batuan beku yang memiliki kandungan mineral yang kuat dan struktur yang padat dengan ketersediaan yang melimpah (Ma dan Zhu, 2017). Penambahan 20% bubuk basal juga menghasilkan stabilitas termomekanik yang sangat baik hingga 160°C. Hal ini menandakan kemampuan material tersebut untuk mencegah deformasi permanen dengan mempertahankan ketahanannya terhadap suhu tinggi (Barczewski dkk., 2020).

Pembuatan *cellular glass* umumnya menggunakan metode *direct foaming* yaitu dengan mencampur *polyurethane foam* (*polyol* dan *isocyanate*) pada bahan baku.

Penggunaan *poliurethane foam* dengan tambahan *fly ash* menghasilkan rentang densitas yaitu 35,9 kg/m³ hingga 44,8 kg/m³ (Zygmunt-Kowalska dkk., 2022). Sementara itu, serbuk kaca seperti SiO₂, dan Al₂O₃ dengan ukuran halus homogen akan mengurangi ruang antar sel ketika disisipkan ke dalam *polyurethane foam*. Penggunaan metode *direct foaming* dengan *polyurethane foam* membantu proses pembusaan dengan cepat. Setelah proses pembusaan selasai, tahap selanjutnya adalah memasukkan *cellular glass* ke dalam oven untuk menghilangkan kadar air sebelum dipanaskan pada suhu tinggi (Kristály dkk., 2021).

Pemanasan pada suhu tinggi telah terbukti memiliki dampak signifikan terhadap densitas material yang dihasilkan. Sebagai contoh, pemanasan pada suhu 850°C telah menghasilkan densitas antara 0,19 hingga 0,25 g/cm³ (Axinte dkk., 2021). Pada penelitian lain, penggunaan silika (dari limbah kaca) dalam proses pemanasan di atas 950°C telah menunjukkan nilai densitas terbaik sebesar 0,29 g/cm³. Nilai densitas meningkat seiring bertambahnya suhu dan durasi pemanasan terhadap sifat *cellular glass*. Pada suhu 950°C dengan penahanan selama 2 jam, peningkatan tekanan internal telah mempengaruhi pengurangan pori dengan keluarnya gas (Paunescu dkk., 2021). Selain itu, densifikasi atau proses pemadatan juga terjadi karena dalam proses pembuatannya, *cellular glass* disinter secara bertahap hingga suhu akhir adalah 950°C sejalan dengan penelitian pada tahun 2021, yang menyimpulkan adanya peningkatan suhu sintering pada serbuk basal memungkinkan terjadinya perubahan struktur bahan penyusun yang saling mengikat sehingga massa jenis bertambah (Hendronursito dkk., 2021).

Merujuk pada penelitian-penelitian sebelumnya, maka perlu dilakukan inovasi pembuatan *cellular glass* dengan memanfaatkan silika batu basal menggunakan metode *direct foaming* pada suhu sintering minimal 950°C. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan komposisi dan durasi penggilingan bahan penyusun *cellular glass* (serbuk basal dan *slag boiler*). Penelitian dilakukan untuk mengetahui sifat fisik (densitas dan porositas) dan sifat mekanik (kuat tekan). Selain itu, dilakukan pula analisis senyawa kimia menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF), analisis fasa kristalin menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), dan analisis struktur mikro menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM).

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan terhadap kandungan senyawa kimia, fasa kristalin, dan struktur mikro *cellular glass*?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan terhadap sifat fisik dan mekanik *cellular glass*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut :

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan terhadap kandungan senyawa kimia, fasa kristalin, dan struktur mikro *cellular glass*.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan terhadap sifat fisik dan mekanik *cellular glass*.

1.4 Batasan Penelitian

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bahan baku yang digunakan merupakan batu basal yang berasal dari Mataram Baru, Lampung Timur.
2. *Slag boiler* yang digunakan adalah *slag boiler* cangkang kelapa sawit dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah.
3. *Fly ash* yang digunakan berasal dari PLTU Bukit Asam, Lampung Selatan.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
2. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai acuan untuk peneliti selanjutnya mengenai pembuatan *cellular glass*.
3. Hasil penelitian dapat dijadikan informasi pengetahuan untuk industri bahan konstruksi dalam pembuatan *cellular glass*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Cellular Glass*

Di dunia konstruksi modern, penelitian terus berlanjut untuk menemukan material yang ringan, kuat, dan ramah lingkungan. Salah satu inovasi yang menarik perhatian adalah penggunaan *cellular glass*. *Cellular glass* atau kaca seluler merupakan jenis material insulasi panas berbentuk padatan yang terdiri dari gelembung udara yang terperangkap di dalam matriks kaca. Struktur berpori yang dihasilkan *cellular glass* memiliki sifat isolasi termal yang sangat baik sehingga ideal untuk aplikasi dalam industri seperti petrokimia atau perpipaan bawah tanah. *Cellular glass* dibuat dengan perlakuan panas pada suhu tinggi dari campuran serbuk limbah kaca daur ulang, bahan pengembang, dan bahan aditif lainnya untuk memfasilitasi proses berbusa. Pembuatan *cellular glass* ditujukan untuk mendapatkan produk berpori yang lebih padat dengan kekuatan mekanik yang tinggi dan ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Cellular Glass* (Paunescu dkk., 2021).

Cellular glass umumnya dibuat dengan mencampurkan limbah kaca yang mengandung SiO_2 dengan CaCO_3 sebagai bahan pengembang dan larutan

Na_2SiO_3 (dikenal sebagai *waterglass*) sebagai aditif perekat. Pencampuran bahan baku dengan bahan pengembang menyebabkan pembentukan gelembung sehingga dapat dipertahankan morfologi berporinya. Selain CaCO_3 , bahan pengembang lain yang umum digunakan yaitu SiC , MnO , CaSO_4 , dan gliserol. Penggunaan bahan pengembang dapat membentuk pori-pori atau struktur seluler di dalam material kaca. Sedangkan, bahan aditif perekat dapat membantu merekatkan sampel selama proses pemanasan (Paunescu dkk., 2021).

Penggunaan berbagai bahan dalam pembuatan *cellular glass* memiliki dampak yang signifikan terhadap sifat akhirnya. Penggunaan 10% bubuk basal dalam massa bahan mentah menghasilkan peningkatan signifikan dalam kekuatan tekan yang mencapai hampir 30 MPa, hampir dua kali lipat dari batu silika tradisional (Kostrzewa-Demczuk dkk., 2023). Sementara, penggunaan *fly ash* dari sisa pembakaran batubara dapat memberikan rentang densitas yang bervariasi. Nilai densitas dengan uji coba pada suhu sintering antara 1180°C dan 1200°C menghasilkan nilai densitas yaitu 0,98 g/cm³ (Wang dkk., 2018).

Variasi ukuran partikel juga terbukti mempengaruhi sifat akhir *cellular glass*. Partikel yang lebih halus dapat menghasilkan pori-pori yang lebih kecil. Sementara partikel yang lebih besar dapat menghasilkan pori-pori yang lebih besar. Pada penelitian tahun 2014 mengenai penggabungan jenis bahan dan *glass cullet*, menunjukkan bahwa kekuatan bahan dapat meningkat seiring dengan ukuran partikel *glass cullet* yang lebih kecil (Lu dkk., 2014).

Selain itu, sifat akhir *cellular glass* juga dipengaruhi oleh proses sintering. Pada proses sintering, partikel serbuk basal dan bahan lain yang dibuat dalam satu wadah saling menempel. Penambahan karbon menyebabkan karbon berinteraksi dengan oksigen menghasilkan karbon dioksida sehingga menyumbang banyak gas di ruang *cellular*. Pada suhu sintering 950°C, sifat tekan dan kekuatan lentur memuncak sesuai dengan nilai kepadatan maksimum (Zhang dkk., 2011).

2.2 Fly Ash

Aktivitas industri pertambangan menghasilkan limbah B3 dan limbah non-B3 yang merupakan sisa usaha atau kegiatan. Limbah B3 mengandung bahan berbahaya dan beracun, seperti minyak pelumas, *slag* timah putih, dan tailing. Sedangkan limbah non-B3 tidak menunjukkan karakteristik dari limbah bahan berbahaya, seperti *fly ash* dan *bottom ash* atau keduanya dikenal dengan sebutan FABA. *Fly ash* batubara dari kegiatan PLTU dengan teknik boiler FCB (*Circulating Fluidized Bed*) dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku konstruksi pengganti semen pozzolan (Bhatt dkk., 2019).

Fly ash atau yang dikenal sebagai abu terbang adalah limbah padat hasil pembakaran batubara di suatu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Dalam beberapa kasus, *fly ash* digunakan sebagai penguat semen dalam beton campuran karena sifat penggeraan dan daya tahannya yang dianggap baik. Oleh karena itu, perlu adanya tindakan lebih baik *fly ash* daripada sekadar dibuang secara aman untuk mencegah pencemaran lingkungan, yaitu harus diperlakukan sebagai sumber daya konstruksi yang berharga. Upaya ini dapat sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan dalam hal pengurangan jejak karbon dalam produksi semen dan pengurangan produk sampingan yang dibuang di tempat pembuangan akhir (Rashad, 2015).



Gambar 2.2 Jenis-jenis *fly ash*: (a) *high-calcium* dan (b) *low-calcium* (Chindaprasirt dan Rattanasak, 2023).

Fly ash dikelompokkan menjadi dua macam yaitu *high-calcium fly ash* (tipe C) dan *low-calcium fly ash* (tipe F). Pada *high-calcium fly ash* (gambar a), terdapat kandungan CaO (kalsium oksida) yang tinggi hingga lebih dari 20%. *High-*

calcium fly ash mengacu pada *fly ash* yang dihasilkan dari pembakaran batubara dengan karbonat tinggi yang memiliki butiran halus dan reaktif secara kimia. Sedangkan pada *low-calcium fly ash* (gambar b), terdapat kandungan CaO (kalsium oksida) yang rendah kurang dari 10% dengan kandungan SiO₂ (silika), Al₂O₃ (alumina), dan besi yang tinggi. *Low-calcium fly ash* mengacu pada abu terbang dari pembakaran batubara antrasit atau subbituminous yang berkarbon rendah (Bhatt dkk., 2019).

Penggunaan *fly ash* pada pembuatan *cellular glass* telah berhasil dilakukan pada penelitian tahun 2012 oleh Chen, dkk. *Cellular glass* dengan kandungan tinggi *fly ash* (50-70%) dibuat pada suhu 800°C menggunakan *fly ash* sebagai bahan baku utama, dengan kalsium karbonat dan natrium borat sebagai bahan pembusa dan bahan pengisi. Didapatkan bahwa *cellular glass* dengan kandungan *fly ash* tinggi yang disinter pada suhu 800°C memiliki sifat komprehensif yang sangat baik, diantaranya densitas dan porositas yang lebih unggul daripada busa serupa yang dibuat sebelumnya.

2.3 Basal Scoria

Secara garis besar, terdapat tiga jenis batuan yaitu: batuan sedimen (*sedimentary rock*), batuan metamorf (*metamorphic rock*), dan batuan beku (*igneous rock*). Batuan sedimen terbentuk melalui proses pengendapan material dari erosi batuan lain, organisme, atau endapan kimia. Contoh batuan sedimen adalah batu pasir, batu kapur dan batu lempung. Sedangkan, batuan metamorf terbentuk melalui transformasi batuan sedimen di bawah tekanan dan suhu tinggi di dalam kerak bumi. Contoh batuan metamorf adalah batu marmer, batu ardesia, dan batu amfibolit. Sementara, batuan beku terbentuk dari magma atau molten (*melted rock*) yang mengalami pendinginan dan pengerasan yang terjadi di dalam kerak bumi (batuan beku intrusif) atau di permukaan bumi (batuan beku ekstrusif). Contoh batuan beku intrusif adalah granit dan diorit. Sedangkan, contoh batuan beku ekstrusif adalah batu basal yang ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Basal scoria (Stevens dkk., 2019).

Pendinginan secara cepat dan lambat pada batuan beku, mempengaruhi karakteristik batuan yang terbentuk. Jika magma mendingin secara cepat, maka akan terbentuk kaca vulkanik yang memiliki struktur amorf. Hal ini disebabkan karena waktu pembentukan kristal sangat terbatas sehingga menghasilkan batuan beku dengan tekstur yang halus atau bahkan amorf. Sedangkan, jika magma mendingin secara lambat, memberikan waktu pembentukan kristal lebih banyak sehingga menghasilkan tekstur yang berbutir dan dapat terlihat jelas (Singha, 2012).

Batuan beku terdiri dari banyak mineral, merupakan zat anorganik yang berasal bukan dari hewan atau tumbuhan. Komposisi kimia dari batuan beku dinyatakan dengan kandungan oksida dari unsur utamanya, seperti SiO_2 , FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , MnO , P_2O_5 , dan TiO_2 . Kandungan silikon dioksida (SiO_2) merupakan karakteristik kimia yang paling signifikan dari batuan beku. Berdasarkan jumlah kandungan silikon dioksida, batuan beku dibedakan atas:

1. Batuan Beku Asam

Batuan beku asam mengandung $\text{SiO}_2 > 63\%$, plagioklas asam, dan mineral kuarsa.

2. Batuan Beku Intermediet

Batuan beku intermediet atau netral mengandung SiO_2 sebanyak 52- 63%, plagioklas netral, dan tidak mengandung kuarsa.

3. Batuan Beku Mafik

Batuhan beku mafik atau dasar mengandung SiO_2 sebanyak 45-52%, plagioklas dasar, mineral ferromagnesian, seperti piroksen, amfibol, dan olifin.

4. Batuan Beku Ultrabasa

Batuhan beku ultrabasa mengandung $\text{SiO}_2 < 45\%$, tidak mengandung plagioklas dasar dan utamanya terdiri dari mineral ferromagnesian, yaitu mineral yang kaya zat besi dan magnesium dan rendah silika (Barczewski dkk., 2020).

Batu basal scoria merupakan batuan beku luar (*ekstrusif aphanitic*) yang sebagian besar mengandung silikat. Batu basal berasal dari lava mafik (lava dengan kandungan silika lebih rendah dibandingkan dengan lava felsik) yang mengalami pendinginan cepat di permukaan bumi dengan viskositas rendah yang kaya akan Mg (magnesium) dan Fe (besi). Pendinginan yang cepat menghasilkan tekstur yang halus dan menyebabkan tidak terbentuknya kristal-kristal batuan. Berdasarkan komposisi kimia yang terkandung, batu basal scoria termasuk batuan yang bersifat basa karena kandungan utamanya SiO_2 sebanyak 45-55% dan diikuti oleh Al_2O_3 , $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$, CaO , MgO , Na_2O , K_2O , TiO_2 . Sifat atmosferik dari SiO_2 menyebabkan basal scoria digunakan sebagai komponen bahan bangunan tahan api. Sedangkan komponen lainnya, Al_2O_3 dapat meningkatkan ketahanan kimia dari filamen basal, serta CaO , MgO , dan TiO_2 dapat meningkatkan ketahanan air dan ketahanan korosi (Singha, 2012).

2.4 Alkali Aktivator

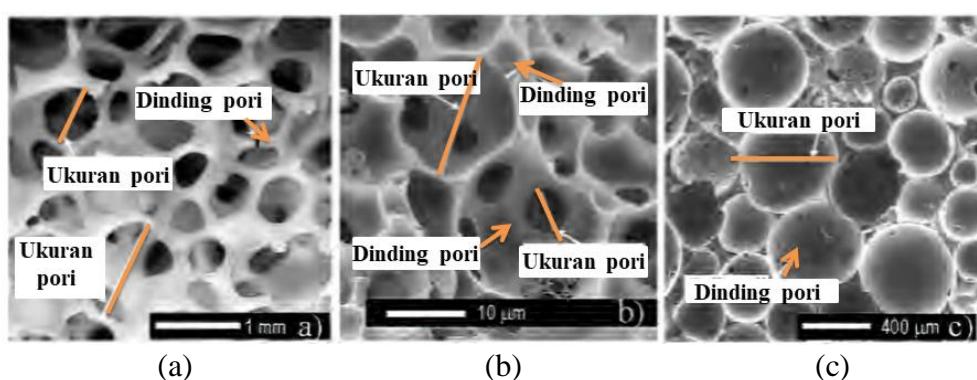
Alkali aktivator adalah larutan yang mengandung ion alkali seperti Na^+ (natrium) atau K^+ (kalium), dan biasanya diperoleh dari bahan kimia seperti NaOH (natrium hidroksida) atau KOH (kalium hidroksida). Pada pembuatan *cellular glass*, alkali aktivator (NaOH) memiliki peranan penting untuk mengaktifkan prekursor (bahan dasar yang mengandung komponen SiO_2 dan Al_2O_3) sehingga menyebabkan reaksi kimia yang menghasilkan gel dan membentuk material geopolimer. Reaksi kimia antara alkali aktivator dan precursor (reaksi alkali aktivasi) menghasilkan ikatan yang mengikat partikel-partikel padat dari prekursor sehingga membentuk

struktur gel. Alkali aktivator berperan penting dalam membentuk matriks padat dan kuat yang memberikan sifat mekanis yang baik pada proses polimerasi (Kwek dkk., 2021).

Material *cellular glass* yang dihasilkan dari proses pencampuran dengan alkali aktivator memiliki kepadatan yang tinggi karena dipengaruhi oleh kandungan Na pada alkali activator. Penambahan kandungan NaOH meningkatkan potensi terjadinya pengkristalan yang diakibatkan oleh ion natrium (unsur alkali) yang berlebihan dalam campuran. Ion natrium bereaksi dengan karbon dioksida di atmosfer dan menyebabkan timbulnya bintik-bintik putih. Namun, adanya pengkristalan tidak secara langsung mempengaruhi kekuatan geopolimer. Sebagian besar ion natrium yang berlebihan dapat keluar tanpa mengurangi kekuatan tekan material. Hasilnya, rasio aktivator alkali yang lebih rendah berhubungan dengan kekuatan material yang lebih rendah (Kwek dkk., 2021).

2.5 Metode *Direct Foaming*

Cellular glass dapat diproduksi dengan tiga proses yang berbeda, yaitu replikasi pola berbusa, *direct foaming* dari *slurry*, dan penghilangan bahan pembentuk pori yang mudah menguap. Perbedaan struktur yang diperoleh pada ketiga metode ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Struktur mikro yang diperoleh dengan metode: (a) replika; (b) penghilangan bahan pembentuk pori; dan (c) *direct foaming*.

Direct foaming adalah metode pembuatan *cellular glass* dengan memanfaatkan pembentukan gelembung di dalam larutan yang biasanya mengandung aditif seperti surfaktan dan pengikat (*foaming agent*). *Cellular glass* yang diproduksi dengan metode *direct foaming* memiliki struktur padat sehingga memberikan sifat mekanik yang lebih tinggi. Morfologi *cellular glass* dengan *direct foaming* berbeda dari busa yang diperoleh dengan teknik replica. Dinding sel yang mengandung pori-pori yang saling terhubung (jendela sel) hadir pada teknik replika, sehingga memberikan perilaku permeabilitas yang berbeda. Salah satu bahan berbusa yang memiliki keunggulan untuk mengurangi bobot komponen adalah busa polimer *Polyurethane*. *Polyurethane foam* adalah jenis busa polimer yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk insulasi, bantalan, dan pengemasan. Reaksi pembentukan *Polyurethane foam* melibatkan reaksi eksotermik, artinya reaksi pelepasan energinya dalam bentuk panas (Barg dkk., 2008).

Polyurethane foam dibentuk dari dua komponen utama yaitu *Isocyanates* dan *Polyols* yang menghasilkan pembentukan sel yang saling berhubungan. *Isocyanates* berperan sebagai pembentuk ikatan polimer dengan *Polyols*, memberikan kekuatan, kekakuan, dan sifat mekanik pada *Polyurethane*. Sedangkan *Polyols* adalah senyawa yang mengandung gugus hidroksil (OH) dan berfungsi sebagai pemberi fleksibilitas dan elastisitas pada *Polyurethane*. Selain *Isocyanates* dan *Polyols*, dalam pembuatan *Polyurethane* juga memerlukan bahan lain, diantaranya: agen pengembang, zat pengisi, katalis, dan zat penstabil.

Sifat busa *Polyurethane* dikategorikan berdasarkan struktur busa. Busa memiliki dua jenis struktur: struktur sel terbuka dan struktur sel tertutup. Busa berstruktur sel terbuka terasa seperti bantal lembut. Dinding sel, atau permukaan gelembung, dipecah dan diisi dengan udara yang memenuhi semua ruang dalam materi. Nilai insulasi busa sel terbuka berkaitan dengan nilai insulasi udara tenang di dalam matriks sel yang rusak. Kepadatan busa sel terbuka sekitar $8-12\text{kg/m}^3$. sedangkan pada busa sel tertutup, densitas bergantung pada kekerasan. Normalnya, Insulasi sel tertutup atau PU flotasi memiliki kerapatan antara 32 dan 48kg/m^3 sehingga cukup kuat untuk menahan distorsi besar. Sebagian besar sel atau gelembung

dalam buih tidak pecah dan menyerupai bola sepak ditumpuk bersama dalam konfigurasi yang kompak. Hal ini membuat busa kuat atau kaku karena gelembung cukup kuat untuk menerima banyak tekanan, seperti ban yang digembungkan yang menahan beban mobil. Sel-selnya penuh dengan gas khusus, dipilih untuk membuat nilai insulasi busa setinggi mungkin (Thomas dkk, 2018).

2.6 Uji Fisik dan Mekanik

2.6.1 Densitas

Kerapatan atau densitas (ρ) adalah ukuran fisik yang menunjukkan hubungan kuantitas sejauh mana massa (m) suatu benda terkonsentrasi pada ruang (V) yang ditempatinya, dengan satuan gram per sentimeter kubik (g/cm^3). Persamaan umum densitas ditunjukkan pada Persamaan (2.1).

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

Metode umum yang digunakan dalam perhitungan nilai densitas adalah metode Archimedes. Prinsip utama dari metode Archimedes adalah besarnya gaya apung benda yang direndam dalam fluida sama dengan banyaknya fluida yang dipindahkan oleh benda tersebut. Pengujian densitas dilakukan dengan tujuan mengetahui kerapatan antar molekul terdistribusi dalam suatu objek atau substansi (Sihombing dkk., 2016).

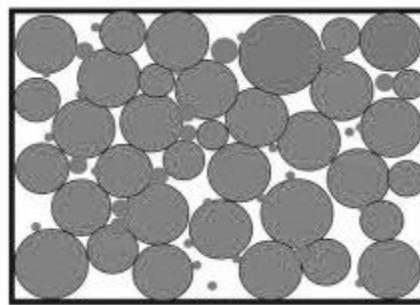
Menurut ASTM C642-06, untuk menghitung nilai densitas dapat menggunakan Persamaan (2.2):

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \rho_{air} \quad (2.2)$$

Dengan ρ adalah densitas (g/cm^3), m_1 adalah massa kering (g), m_2 adalah massa jenuh (g), m_3 adalah massa dalam air (g), dan ρ_{air} adalah massa jenis air (g/cm^3).

2.6.2 Porositas

Porositas adalah nilai fraksi volume ruang kosong terhadap total volume. *Cellular glass* terdiri dari butir-butir zat padat yang diantaranya terdapat ruang kosong yang memungkinkan untuk bersirkulasi. Ruang kosong pada *cellular glass* berasal dari proses pemanasan dan kandungan silika pada bahan yang digunakan. Ruang kosong yang terdistribusi pada material ditunjukkan pada Gambar 2.5. Apabila volume ruang kosong atau pori dalam *cellular glass* meningkat, porositas juga meningkat sehingga akan mengurangi kekuatan *cellular glass*. Rentang nilai porositas ada pada nilai antara 0 dan 1 atau dalam bentuk persentase (Shimamura, 2022).



Gambar 2.5 Distribusi ruang kosong pada material.

Cellular glass yang berpori dapat dihitung porositasnya dengan menerapkan metode Archimedes sesuai dengan ASTM C642-06 pada persamaan (2.3):

$$\varphi = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m_3} \times 100\% \quad (2.3)$$

Dengan φ adalah porositas (%), m_1 adalah massa kering (g), m_2 adalah massa jenuh (g), dan m_3 adalah massa dalam air (g).

2.6.3 Kuat Tekan

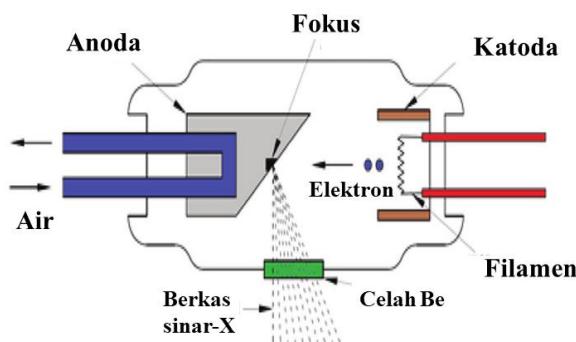
Kuat tekan adalah kemampuan sampel untuk menerima gaya tekan per satuan luas. Pengujian kuat tekan umumnya menggunakan rumus perhitungan pada Persamaan (2.6) sesuai dengan standar ASTM C-305-82:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.4)$$

Dengan P adalah kuat tekan sampel (MPa), F adalah beban maksimum (N), dan A adalah luas penampang benda (mm^2).

2.7 Karakterisasi dengan Sinar-X

Karakterisasi menggunakan sinar-X memiliki keunggulan karena sinar-X memiliki kemampuan untuk menembus materi dan berinteraksi dengan struktur atomik dari bahan. Panjang gelombang sinar-X sebesar 1 \AA dengan rentang frekuensi sebesar 10^{16} hingga 10^{20} Hz dan energi sebesar 100.000 eV atau setara dengan $1,6 \times 10^{-14} \text{ J}$. Sinar-X diproduksi ketika elektron yang berakselerasi ke kecepatan yang sangat tinggi dalam tabung sinar-X yang terdiri dari dua elektroda logam: katoda sebagai sumber elektron dan anoda sebagai target logam di dalam ruang vakum, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.6.

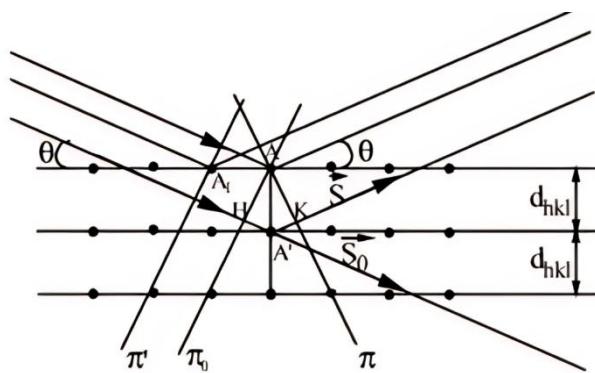


Gambar 2.6 Komponen pada tabung sinar-X (Reyes dkk., 2020).

Elektron diproduksi dengan memanaskan katoda filamen tungsten oleh aliran arus listrik pada kisaran 20-60 kV. Katoda berada pada potensial negatif yang tinggi dan elektron dipercepat menuju anoda. Elektron dengan kecepatan sangat tinggi, bertabrakan dengan anoda berpendingin air. Ketika bertabrakan dengan target, elektron kehilangan energi kinetik dan dipancarkan sebagai sinar-X. Sinar-X dipancarkan dari anoda ke segala arah yang memungkinkan. Hanya sebagian kecil (kurang dari 1%) berkas elektron yang diubah menjadi sinar-X, karena hanya sinar sempit yang membuat sudut kecil dengan permukaan target yang diizinkan keluar dari tabung melalui jendela yang terbuat dari bahan berkoefisien penyerapan rendah untuk sinar-X, seperti berilium (Be). Sedangkan, sebagian besar berkas elektron hilang sebagai panas dalam anoda logam berpendingin air yang mengalir dari belakang (Reyes dkk., 2020).

2.7.1 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah metode analisis yang digunakan untuk menentukan struktur fasa suatu bahan. Metode ini menggunakan sinar-X sebagai sumber radiasi untuk mengamati pola difraksi yang dihasilkan saat sinar-X melewati sampel. Difraksi sinar-X adalah penceran sinar-X monokromatik yang mengenai sampel dan menyebar ke dalam sistem *detector*. Kemudian *detector* bergerak sepanjang lintasannya untuk merekam pola difraksi sinar-X. Untuk mengurangi waktu yang diperlukan untuk mengukur pola difraksi, jumlah foton sinar-X yang mengenai sampel dan meningkatkan efisiensi pendekatan perlu ditambah. Skema difraksi sinar-X oleh sebuah kristal ditunjukkan pada Gambar 2.7 (Xiao dkk., 2023).



Gambar 2.7 Difraksi sinar-X oleh sebuah kristal.

Pertimbangkan kristal yang atom-atomnya terdiri dari bidang kisi paralel yang terpisah sejauh d_{hkl} dan disinari menggunakan sinar-X monokromatik dengan sudut θ . Gambar 2.7 memudahkan untuk menghitung sudut yang harus dibuat dan sudut refleksi yang terbentuk oleh kristal terhadap berkas sinar-X yang datang. Satu sinar datang menumbuk titik A pada bidang atas, namun sinar lainnya harus menempuh jarak tambahan HA' sebelum menumbuk bidang tepat di bawahnya. Demikian pula sinar yang dipantulkan, akan berbeda panjang lintasannya dengan tambahan jarak $A'K$. Diketahui bahwa:

$$\sin \theta = \frac{HA'}{d_{hkl}} \quad (2.5)$$

$$d_{hkl} \sin \theta = HA' \quad (2.6)$$

Untuk mengetahui panjang gelombang lintasan $HA'K$, maka:

$$n\lambda = HA' + A'K \quad (2.7)$$

$$n\lambda = HA' + HA' \quad (2.8)$$

$$n\lambda = 2HA' \quad (2.9)$$

$$\frac{n\lambda}{2} = HA' \quad (2.10)$$

Oleh karena itu, refleksi harus memenuhi syarat hukum Bragg berikut:

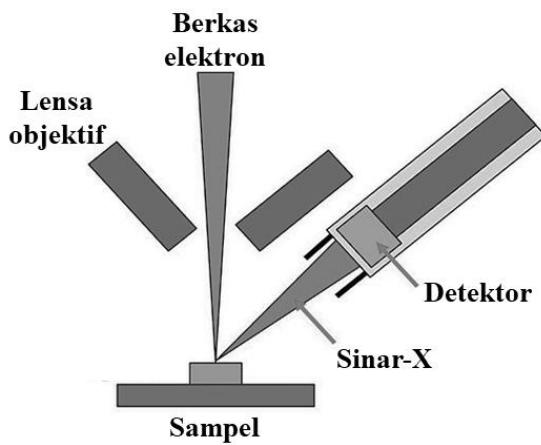
$$d_{hkl} \sin \theta = \frac{n\lambda}{2} \quad (2.11)$$

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.12)$$

Dimana $HA' + A'K$ adalah selisih panjang lintasan kedua berkas sinar atau panjang lintasan, d_{hkl} adalah jarak antar bidang dalam kristal, θ adalah sudut difraksi, n adalah orde difraksi (0, 1, 2,..) dan λ adalah panjang gelombang. Hubungan ini disebut hukum Bragg yang menunjukkan bagaimana jarak interplanar dalam kristal tertentu dapat dihitung dari pengukuran sudut difraksi. Jika seberkas sinar-X dijatuhkan pada kristal, maka bidang kristal akan membiaskan sinar-X yang memiliki panjang gelombang. Sinar yang dibiasakan akan ditangkap oleh *detector* dan menampilkan puncak difraksi. Semakin banyak bidang kristal yang terdapat di dalam sampel, maka semakin kuat intensitas pembiasaan yang dihasilkannya (Xiao dkk., 2023).

2.7.2 X-Ray Fluorescence (XRF)

Spektrometri X-Ray Fluorescence (XRF) adalah teknik analisis untuk menentukan komposisi unsur kimia dalam sampel berdasarkan panjang gelombang dan intensitas spektral tereksitasi. Prinsip dasar kerja XRF dimulai dengan memberi rangsangan berupa sinar-X berenergi tinggi kepada sampel yang ingin dianalisis. Sinar-X dapat dihasilkan oleh alat XRF melalui tabung sinar-X seperti pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema optik sinar-X pada XRF (Ali dkk., 2023).

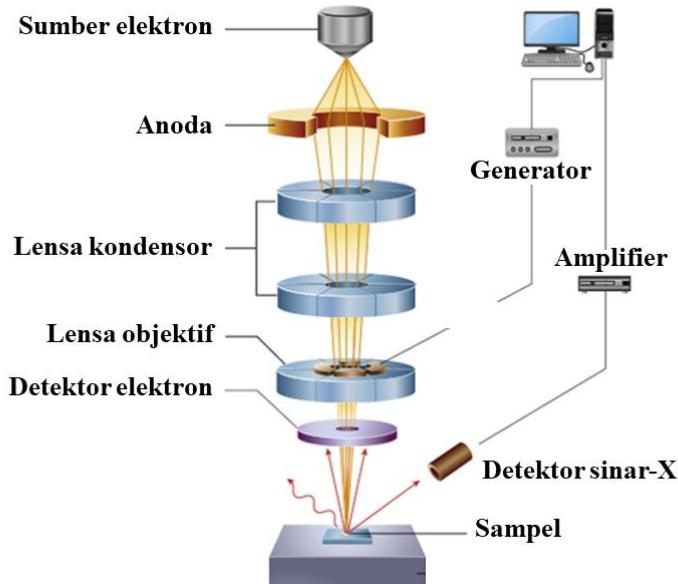
Ketika sinar-X mengenai sampel, sinar-X tersebut akan berinteraksi dengan atom-atom dalam sampel. Interaksi ini menyebabkan terjadinya penyerapan energi sinar-X oleh atom-atom dan mengalami transisi elektron. Beberapa elektron dalam atom dapat terlempar dari kulit dalam (inti atom) ke kulit luar (kulit valensi) atau bahkan keluar dari atom yang disebut fluoresensi. Elektron yang terlempar dari atom akan meninggalkan lubang di kulit dalam. Lubang ini kemudian diisi oleh elektron dari kulit luar yang lebih tinggi energinya. Ketika ini terjadi, energi yang sebelumnya diserap oleh atom dalam bentuk sinar-X dilepaskan dalam bentuk sinar-X fluoresensi yang unik untuk setiap elemen. Sinar-X fluoresensi ini dapat dideteksi dan diukur oleh *detector* XRF (Ali dkk., 2023)

Pada tahap analisis dan identifikasi, intensitas sinar-X fluoresensi akan diukur oleh *detector* XRF yang dipancarkan oleh sampel. Intensitas ini kemudian dibandingkan dengan database referensi yang berisi spektrum sinar-X yang diketahui untuk berbagai unsur kimia. Dengan membandingkan spektrum yang diukur dengan referensi, unsur-unsur kimia yang ada dalam sampel dapat diidentifikasi dan konsentrasi relatif unsur kimia dapat dihitung. Pada tahap analisis kuantitatif, sampel standar dengan komposisi yang diketahui digunakan untuk membuat kurva kalibrasi yang menghubungkan intensitas sinar-X fluoresensi dengan konsentrasi unsur yang sesuai. Hasil pengukuran intensitas

sinar-X fluoresensi digunakan untuk menghitung konsentrasi relatif unsur dalam sampel yang ditampilkan dalam bentuk tabel atau grafik (Xiao dkk., 2023).

2.8 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Pemindaian mikroskop elektron (SEM) adalah metode yang digunakan untuk menyelidiki permukaan bahan dengan perbesaran tinggi. Panjang gelombang radiasi dari sinar-X yang pendek berinteraksi lebih kuat dengan bahan berskala nano dan dapat menghasilkan gambar beresolusi lebih tinggi. Dibandingkan dengan mikroskop cahaya yang hanya mampu mencapai perbesaran 200nm sedangkan elektron bisa mencapai resolusi sampai 0,1-0,2 nm. Prinsip dasar SEM ditunjukkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Prinsip dasar SEM (Inkson, 2016).

Gambar 2.9 menunjukkan prinsip dasar SEM yang melibatkan penggunaan sumber elektron yang dapat bervariasi dalam besaran dan percepatan sehingga menghasilkan aliran elektron yang diarahkan ke sampel. Elektron-elektron dari sumber kemudian bergerak dan dipercepat pada ruang hampa untuk menghindari hamburan elektron yang dipancarkan. Elektron-elektron dipercepat oleh medan listrik dan diarahkan ke permukaan sampel. Ketika elektron-elektron bertabrakan dengan sampel, terjadi interaksi dan menghasilkan berbagai sinyal elektron, seperti elektron sekunder, elektron balikan, dan sinyal lainnya. *Detector* akan

mendeteksi dan mengukur sinyal elektron yang keluar dari sampel. Kemudian, data yang diperoleh digunakan untuk membuat gambar permukaan sampel (Ali dkk., 2023).

SEM digunakan untuk berbagai teknik analisis seperti analisis morfologi, di mana informasi tentang bentuk, tekstur, porositas, dan distribusi partikel dihasilkan. Instrumen ini telah digunakan secara luas untuk menyelidiki sifat pada sintesis *foam glass* dari limbah gelas wadah warna campuran menggunakan natrium silikat sebagai bahan pembusa. Dengan menggunakan SEM, evaluasi morfologi menunjukkan terbentuknya *foam glass* memiliki struktur berpori yang tidak homogen memiliki ukuran yang sangat tersebar yang ditunjukkan dengan adanya banyak pori-pori kecil, pori-pori agak besar dan pori-pori tertutup yang disebabkan oleh aglomerasi partikel dan bahan pembusa yang tidak terdispersi dengan baik (Owoeye dkk., 2020).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada September 2023 sampai Oktober 2024 di Laboratorium Badan Riset dan Inovasi Nasional yang berlokasi di Jl. Sutami Km. 15 Tanjung Bintang, Lampung Selatan. Beberapa laboratorium yang digunakan diantaranya laboratorium nonlogam untuk menguji bahan nonlogam, laboratorium analisis untuk menganalisis karakterisasi bahan, dan laboratorium *heat treatment* untuk perlakuan panas pada *cellular glass*.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: ball mill tipe TR6-Z-A-D112.M4, ayakan 400 mesh ASTM:E11 Nakatama Scientific, *shaker mill*, timbangan digital *gold series ohaus*, *overhead stirrer*, *furnace*, dan alat analisis seperti : *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF) tipe Minipal 4, *Universal Testing Machines* (UTM) tipe HT-2402, dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) tipe *quarto thermo scientific*.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu: batu basal scoria (dari Mataram Baru, Lampung Timur), *fly ash* (dari PLTU tarahan), *slag boiler* (dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah), NaOH 3M, *waterglass*, dan *foaming agent* (jenis *polyurethane foam*).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian yang dilakukan meliputi karakterisasi bahan, pembuatan sampel, uji fisik dan uji mekanik sampel, dan karakterisasi sampel.

3.3.1 Karakterisasi Bahan

Tahapan karakterisasi bahan yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

1. Batu basal scoria dihancurkan dengan *ballmil* selama 3 jam hingga menjadi serbuk, kemudian diayak dengan ayakan 400 mesh.
2. *Slag boiler* dihancurkan dengan *ballmil* selama 3 jam hingga menjadi serbuk, kemudian diayak menggunakan ayakan 400 mesh.
3. *Fly ash* diayak menggunakan ayakan 400 mesh.
4. Batu basal, *slag boiler*, dan *fly ash* dikarakterisasi awal dengan XRD dan XRF yang terdapat di Laboratorium Analisis Badan Riset dan Inovasi Nasional, Lampung Selatan.

3.3.2 Pembuatan Sampel

Penelitian ini memvariasikan komposisi campuran antara basal dan *slag boiler*.

Tahapan pembuatan sampel yang dilakukan pada penelitian ini adalah:

1. Serbuk basal ditimbang dengan variasi komposisi 25%, 50%, dan 75% dengan rincian:
 - a. 10 gram untuk variasi komposisi basal 25% sebanyak 4 wadah
 - b. 20 gram untuk variasi komposisi basal 50% sebanyak 4 wadah
 - c. 30 gram untuk variasi komposisi basal 75% sebanyak 4 wadah
2. Ditambahkan serbuk *slag boiler* ke dalam setiap wadah dengan rincian:
 - a. 30 gram untuk variasi komposisi basal 25%
 - b. 20 gram untuk variasi komposisi basal 50%
 - c. 10 gram untuk variasi komposisi basal 75%
3. Campuran serbuk basal dan serbuk *slag boiler* digiling menggunakan *shaker mill* dengan variasi durasi penggilingan 30 menit, 60 menit, 90 menit, dan 120 menit untuk setiap variasi komposisi basal, seperti pada Tabel 3.1.

4. Kode penyajian data sampel dengan huruf B diikuti oleh angka menunjukkan persentase komposisi basal. Sedangkan t yang diikuti oleh angka menunjukkan durasi penggilingan basal di dalam *shaker mill*.

Tabel 3.1 Variasi komposisi dan durasi penggilingan bahan

Komposisi	Durasi penggilingan (menit)			
	30	60	90	120
Basal 25% + <i>Slag boiler</i> 75%	Sampel B25-t30	Sampel B25-t60	Sampel B25-t90	Sampel B25-t120
Basal 50% + <i>Slag boiler</i> 50%	Sampel B50-t30	Sampel B50-t60	Sampel B50-t90	Sampel B50-t120
Basal 75% + <i>Slag boiler</i> 25%	Sampel B75-t30	Sampel B75-t60	Sampel B75-t90	Sampel B75-t120

5. Semua sampel serbuk hasil penggilingan dicampur dengan 10 gram *fly ash*.
6. Di wadah terpisah, 32 gram waterglass dan NaOH 3M dicampur dengan perbandingan waterglass:NaOH adalah 2:1.
7. Sampel dicampur dengan campuran waterglass dan NaOH hingga membentuk suspensi, lalu didiamkan beberapa saat.
8. Dua bahan *Polyurethane foam* dicampurkan dengan perbandingan 1:1, lalu dimasukkan ke dalam suspensi disertai dengan pengadukan secara cepat selama ± 3 menit.
9. Sampel hasil pengadukan dicetak dengan ukuran diameter 3cm dan tinggi 4cm yang kemudian didiamkan selama ± 3 menit pada suhu ruang.
10. Sampel dimasukkan ke dalam oven pada suhu 60°C selama 24 jam untuk mempercepat proses pengerasan.
11. Sampel dilepaskan dari cetakan kemudian disinter di dalam *furnace* pada suhu 950°C selama 2 jam dengan penahanan selama 2 jam di setiap suhu 400°C dan 700°C dengan tujuan stabilisasi struktur.
12. Sampel didinginkan dengan pendinginan lambat di dalam *furnace* selama 24 jam.

3.3.3 Uji Fisik dan Uji Mekanik Sampel

1) Densitas

Langkah-langkah pengujian densitas dari *cellular glass* sebagai berikut:

- a. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan kering (m_1) menggunakan timbangan digital.
- b. Sampel direndam di dalam air selama 24 jam dengan tujuan agar semua pori terisi air.
- c. Permukaan sampel diusap dengan kain lap.
- d. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan setelah direndam di dalam air (m_2) menggunakan timbangan digital.
- e. Massa sampel ditimbang dalam keadaan digantung dalam air (m_3).
- f. Densitas sampel dihitung menggunakan Persamaan (2.2).

2) Porositas

Langkah-langkah pengujian porositas dari *cellular glass* sebagai berikut:

- a. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan kering (m_1) menggunakan timbangan digital.
- b. Sampel direndam di dalam air selama 24 jam dengan tujuan agar semua pori terisi air.
- c. Permukaan sampel diusap dengan kain lap.
- d. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan setelah direndam di dalam air (m_2) menggunakan timbangan digital.
- e. Massa sampel ditimbang dalam keadaan digantung dalam air (m_3).
- f. Porositas sampel dihitung menggunakan Persamaan (2.3).

3) Kuat Tekan

Langkah-langkah pengujian kuat tekan pada *cellular glass* sebagai berikut:

- a. Sampel diletakkan simetris dengan mesin uji kuat tekan dalam keadaan kering.
- b. Sampel diamati dan dicatat beban tekan maksimum yang dihasilkan oleh sampel ketika dial tidak naik lagi atau ketika sampel sudah hancur.
- c. Kuat tekan sampel dihitung menggunakan Persamaan (2.6).

3.3.4 Karakterisasi Sampel

1) Karakterisasi SEM

Langkah-langkah karakterisasi *cellular glass* menggunakan SEM adalah:

- a. Sampel dilakukan proses *mounting* menggunakan resin dan katalis.
- b. Sampel didiamkan selama 24 jam hingga resin mengeras.
- c. Sampel dilakukan proses *polishing* atau penghalusan permukaan sampel menggunakan grid 1000 untuk memperoleh permukaan *cellular glass* yang mengkilap.
- d. Sampel diletakkan pada mikroskop dekat dengan lensa objektif dengan perbesaran 1000 kali.
- e. Struktur mikro dan morfologi permukaan sampel yang ditampilkan pada layar monitor diamati.
- f. Data sampel hasil karakterisasi SEM dianalisis dengan aplikasi image J.

2) Karakterisasi XRD

Langkah-langkah karakterisasi *cellular glass* menggunakan XRD adalah:

- a. Sampel ditumbuk hingga menjadi serbuk halus menggunakan mortar.
- b. Sampel serbuk diayak menggunakan ayakan 325 mesh.
- c. Sampel serbuk ditimbang sebanyak 2 gram.
- d. Sampel serbuk dimasukkan ke dalam wadah.
- e. Sinar-X diarahkan ke sampel dan menghasilkan pola-pola difraksi.
- f. Pola-pola difraksi ditangkap oleh detektor.
- g. Data pola difraksi dianalisis menggunakan aplikasi *High score plus* dan diidentifikasi fasa kristalinya.

3) Karakterisasi XRF

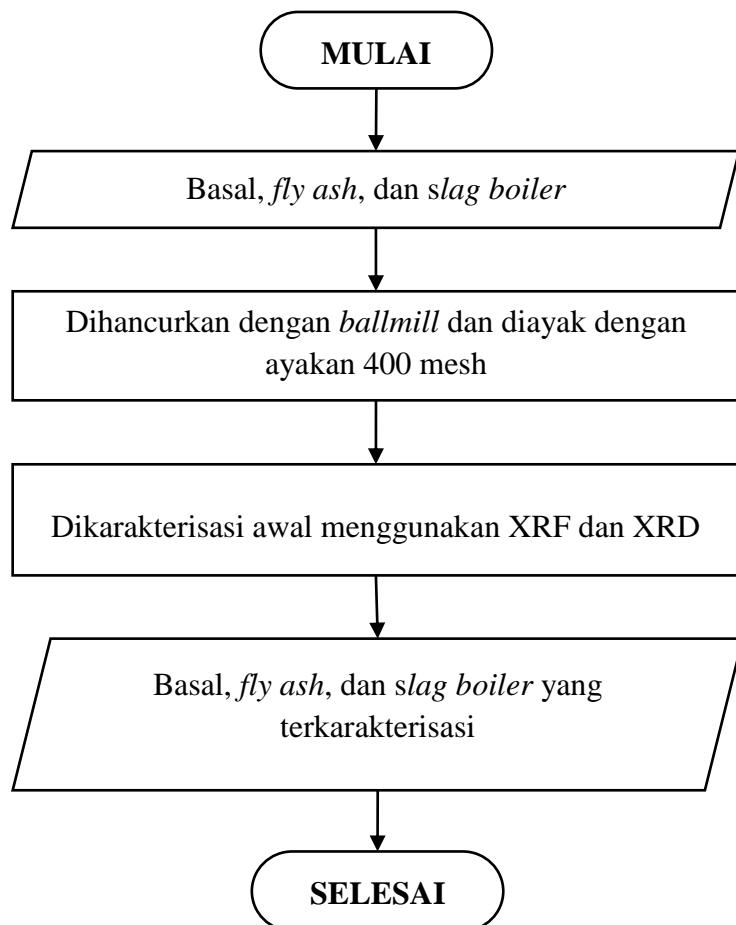
Langkah-langkah karakterisasi *cellular glass* menggunakan XRF sebagai berikut:

- a. Sampel ditumbuk hingga menjadi serbuk halus menggunakan mortar.
- b. Sampel serbuk diayak menggunakan ayakan 325 mesh.
- c. Sampel serbuk ditimbang sebanyak 2 gram.
- d. Sampel serbuk dimasukkan ke dalam wadah.

- e. Sampel serbuk ditembakkan sinar-X dari tabung sinar-X sehingga detektor menerima fluoresensi yang dihasilkan oleh sampel.
- f. Pola fluoresensi yang dihasilkan dianalisis berdasarkan persentase kandungan senyawanya.

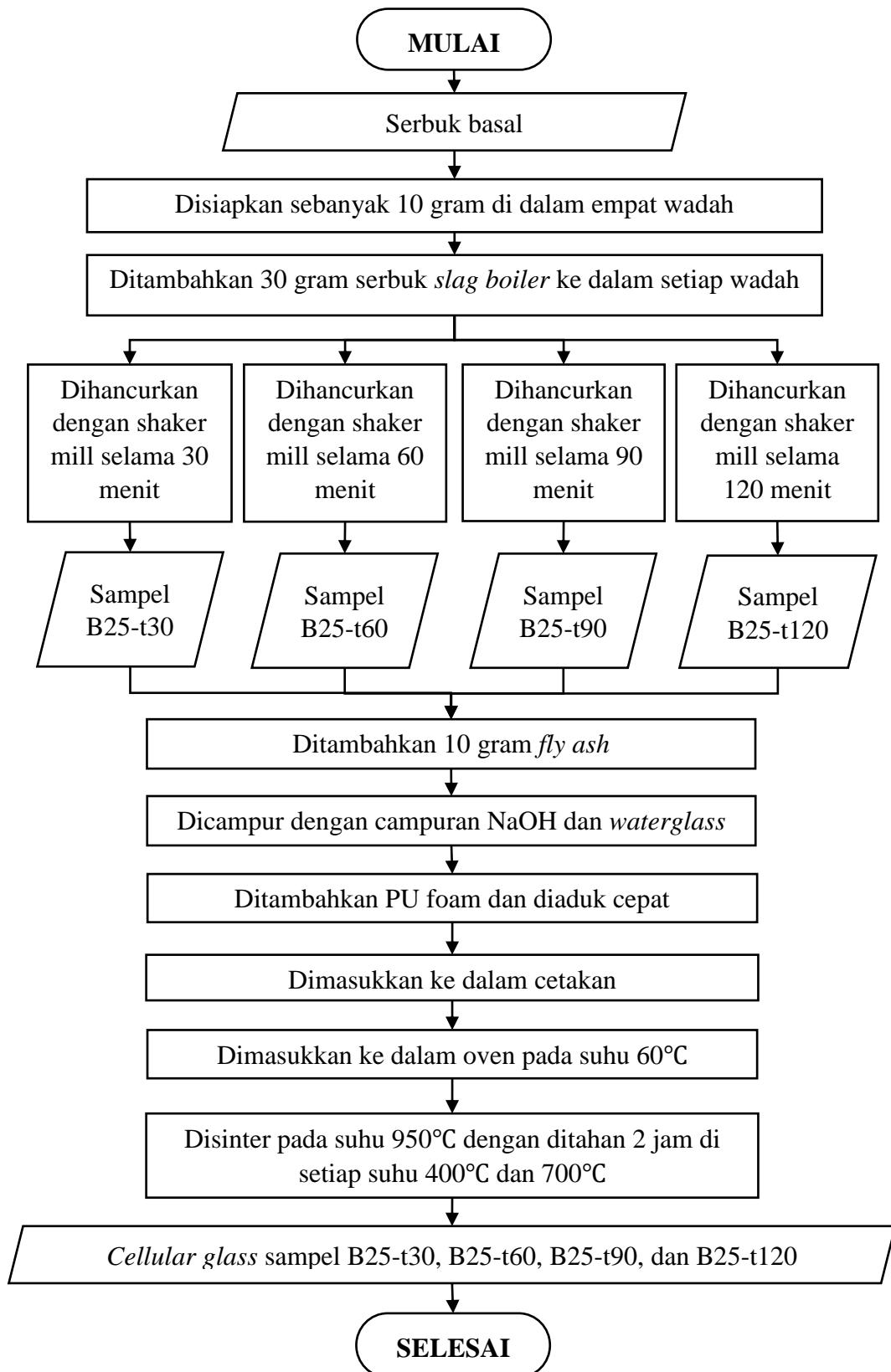
3.4 Diagram Alir

Penelitian dimulai dengan karakterisasi bahan (basal scoria, *fly ash*, dan *slag boiler*) menggunakan XRD, XRF, dan SEM seperti yang ditunjukkan diagram alir pada Gambar 3.1.

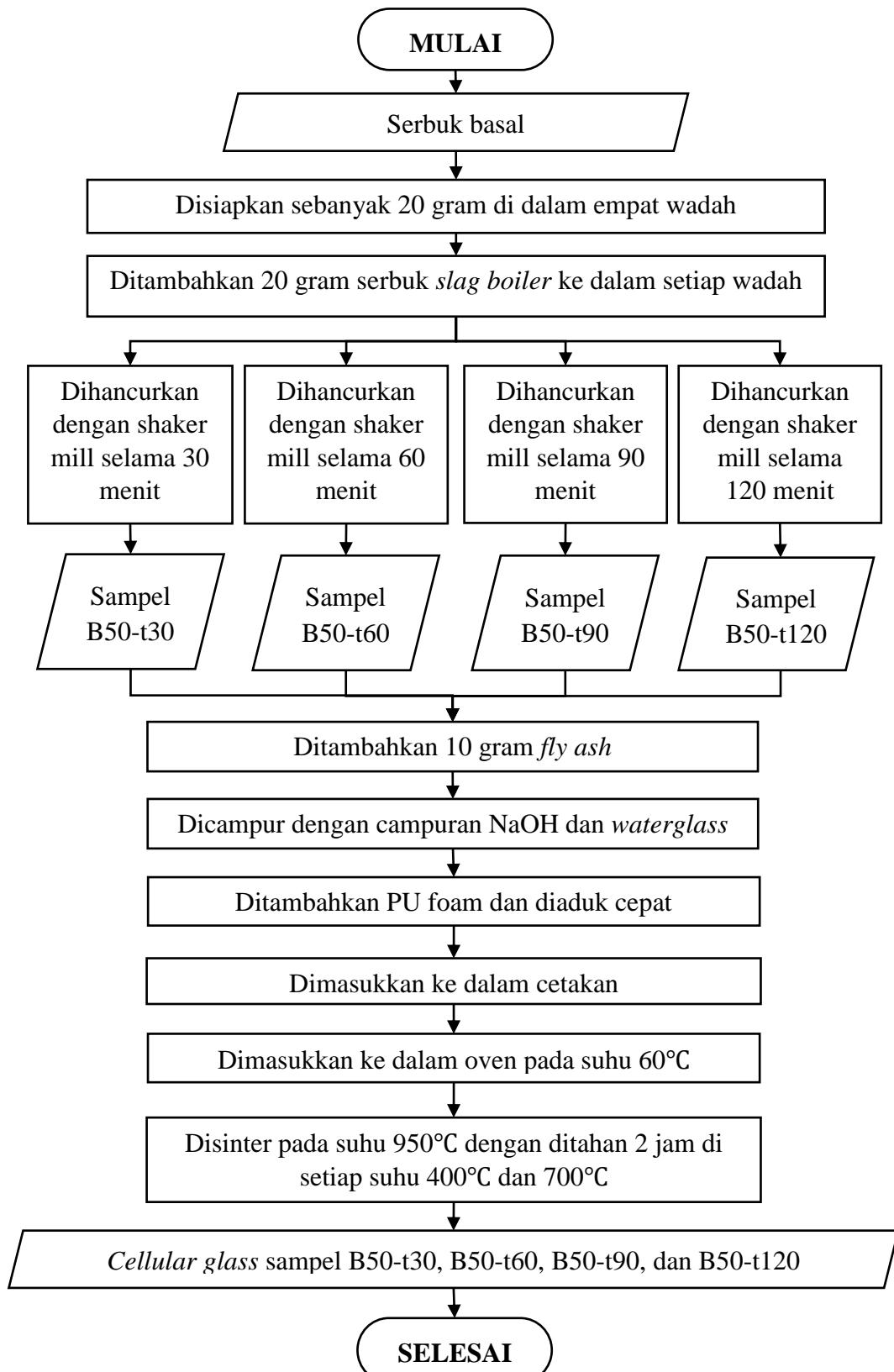


Gambar 3.1 Diagram alir karakterisasi bahan.

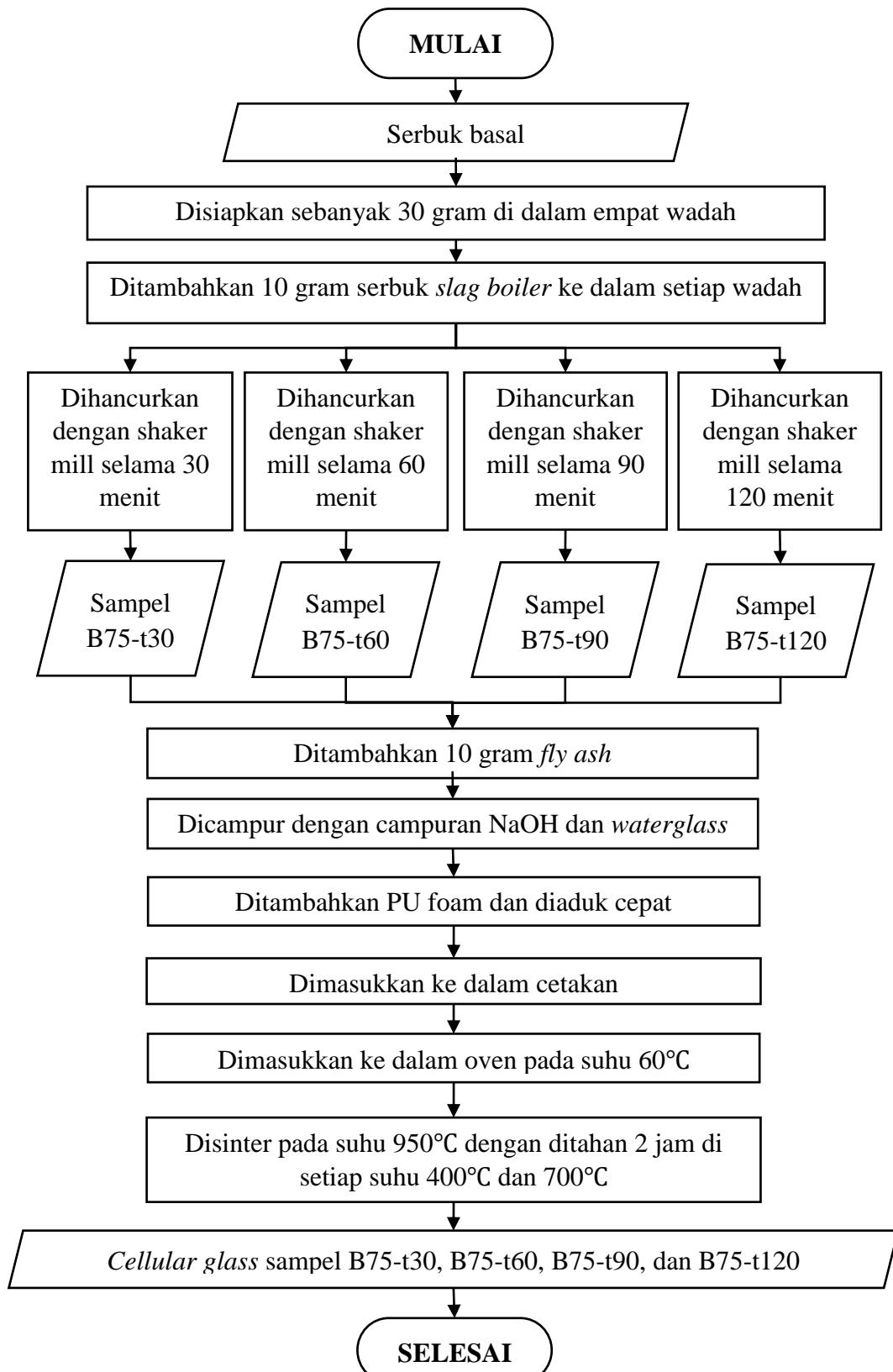
Setelah bahan dikarakterisasi, pembuatan sampel dilakukan seperti yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.2- Gambar 3.4.



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sampel basal 25%.

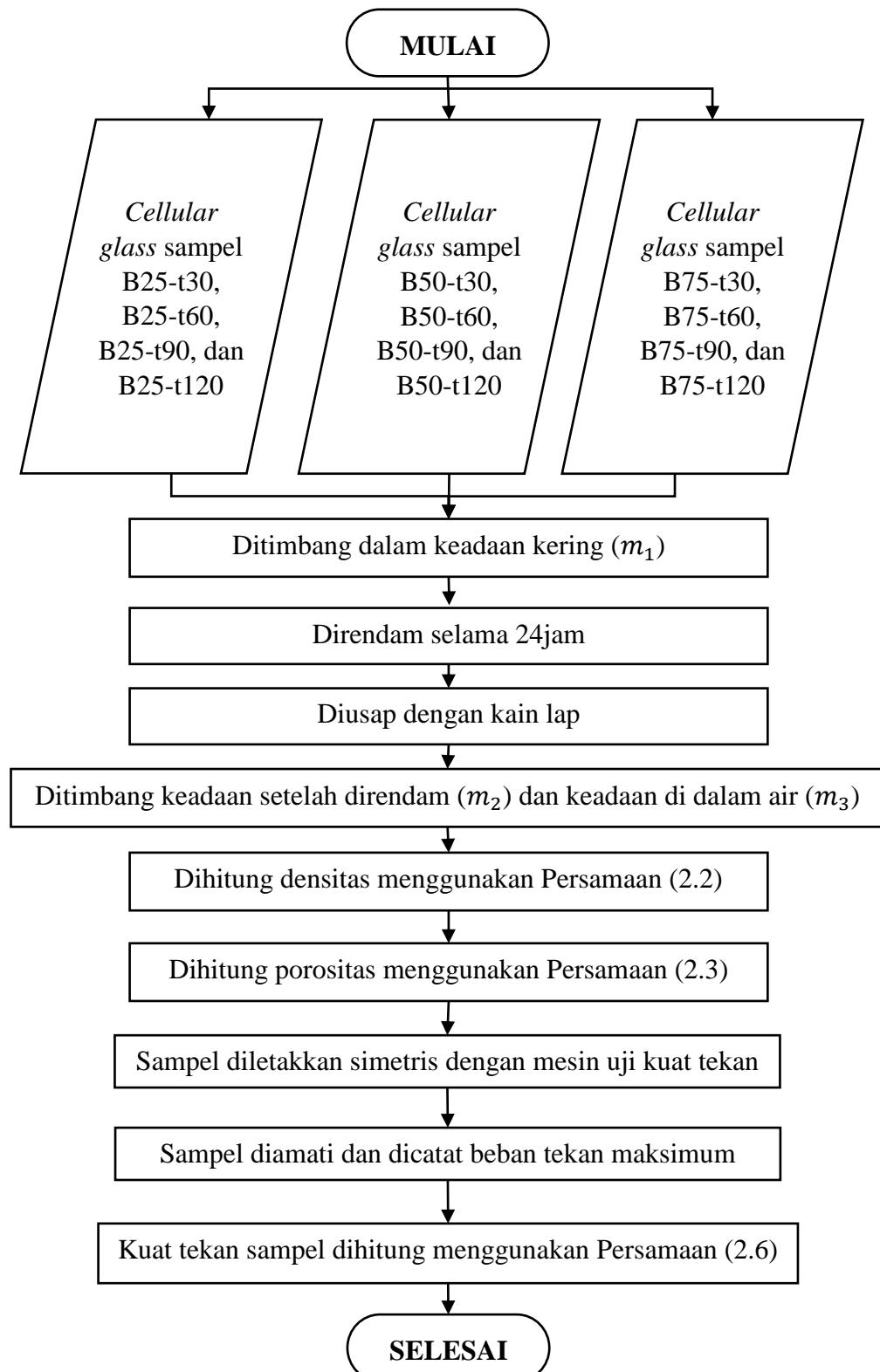


Gambar 3.3 Diagram alir pembuatan sampel basal 50%.



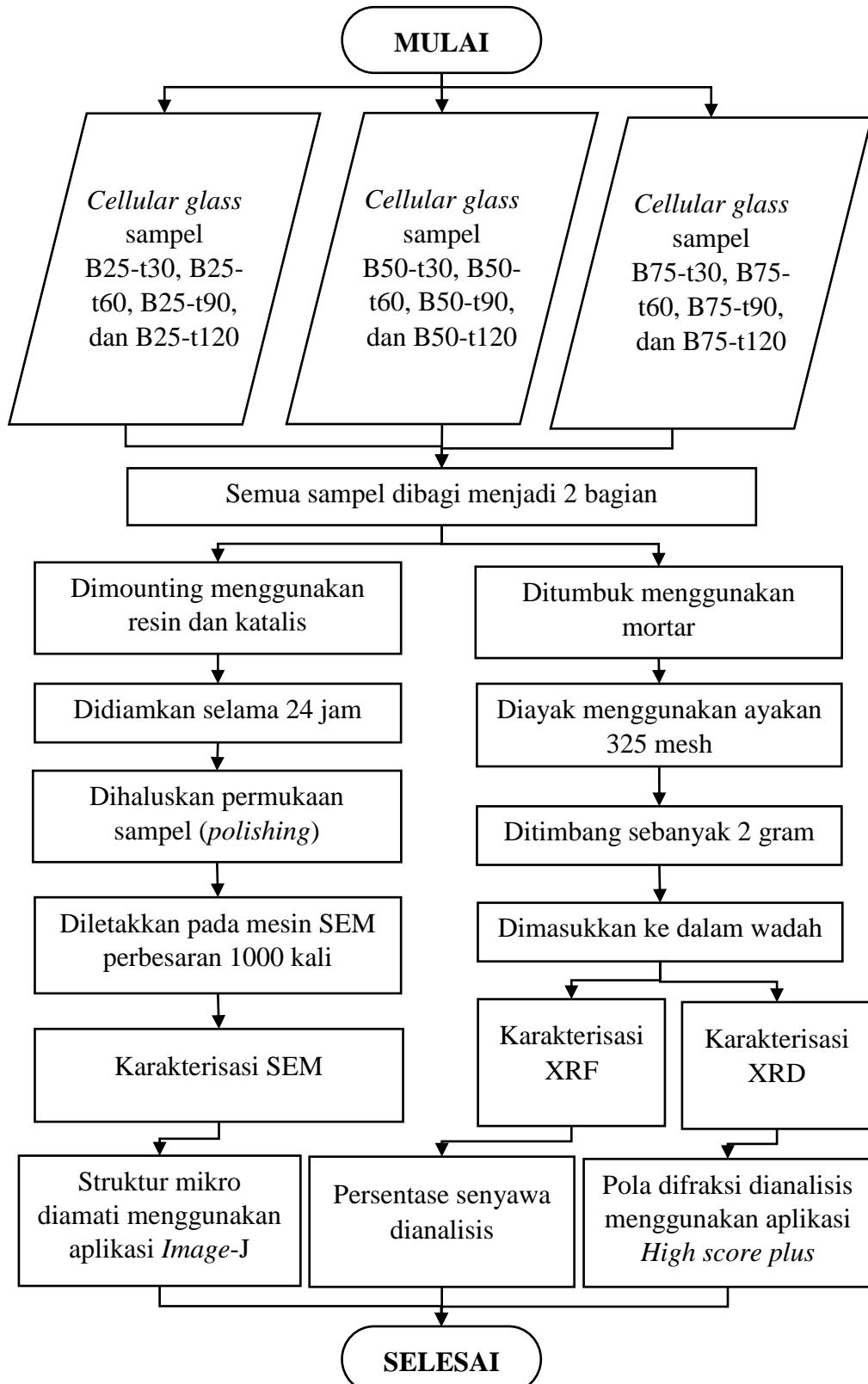
Gambar 3.4 Diagram alir pembuatan sampel basal 75%.

Setelah pembuatan sampel selesai, sampel diuji fisik dan mekanik seperti yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir uji fisik dan uji mekanik.

Selanjutnya, sampel dikarakterisasi seperti yang ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram alir karakterisasi *cellular glass*.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, kesimpulan yang didapat adalah:

1. Variasi komposisi bahan pembuatan *cellular glass* (basal dan *slag boiler*) mengidentifikasi keberadaan senyawa kimia yaitu, SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 yang mendominasi senyawa lain seperti CaO , TiO_2 , P_2O_5 , K_2O , dan MnO pada hasil analisis XRF. Hal ini sejalan dengan fasa kristalin yang muncul salah satunya adalah quartz.
2. Variasi komposisi bahan pembuatan *cellular glass* (basal dan *slag boiler*) menyebabkan adanya fasa kristalin yang beragam pada hasil analisis XRD yaitu, quartz pada komposisi basal 25%; quartz dan magnetite pada variasi komposisi basal 50%; serta quartz, anorthite, magnetite, dan ferrosilite pada variasi komposisi basal 75%.
3. Variasi komposisi bahan pembuatan *cellular glass* (basal dan *slag boiler*) menyebabkan struktur mikro *cellular glass* yang berbeda. Semakin banyak kandungan SiO_2 , maka semakin mengkilap permukaan *cellular glass* yang dihasilkan.
4. Variasi durasi penggilingan bahan menciptakan kepadatan tertinggi pada *cellular glass* durasi 120 menit. Semakin panjang durasi penggilingan bahan (basal dan *slag boiler*), semakin kecil partikel dan pori yang terbentuk seragam pada hasil analisis SEM.
5. Semakin banyak komposisi basal yang digunakan dalam pembuatan *cellular glass*, nilai densitas semakin tinggi sebesar $0,962\text{g/cm}^3$ dan nilai kuat tekan semakin tinggi sebesar 7,603MPa.

6. Semakin lama durasi penggilingan bahan pembuatan *cellular glass* (basal dan *slag boiler*), nilai densitas dan kuat tekan semakin tinggi, sehingga nilai porositas menurun.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran untuk penelitian selanjutnya adalah penelitian mengenai variasi suhu, bahan pengembang, dan sumber silika untuk pembuatan *cellular glass* lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali, A., Zhang, N., dan Santos, R. M. (2023). Mineral characterization using scanning electron microscopy (sem): a review of the fundamentals, advancements, and research directions. *Applied Sciences (Switzerland)*, Vol. 13, No. 23, Hal. 1216–1249.
- Almuqrin, A. H., Mahmoud, K. A., Rilwan, U., dan Sayyed, M. I. (2024). Influence of various metal oxides (PbO, Fe₂O₃, MgO, and Al₂O₃) on the mechanical properties and γ -ray attenuation performance of zinc barium borate glasses. *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 56, No. 7, Hal. 2711–2717.
- Amin, M., Sururiah, E. H., Syafriadi, S., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Birawidha, D. C., dan Sumardi, S. (2021). Leaching basalt rock using averrhoa bilimbi extract. *JKPK (Jurnal Kimia Dan Pendidikan Kimia)*, Vol. 6, No. 2, Hal. 131–137.
- Axinte, S. M., Paunescu, L., dan Dragoeșcu, M. F. (2021). Manufacturing the cellular glass from glass waste by an original unconventional technique. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 19, No. 4, Hal. 54–60.
- Barczewski, M., Mysiukiewicz, O., Lewandowski, K., Nowak, D., Matykievicz, D., Andrzejewski, J., Skorczewska, K., dan Piasecki, A. (2020). Effect of basalt powder surface treatments on mechanical and processing properties of. *Materials*, Vol. 13, No. 23, Hal. 5436–5461.
- Barg, S., Soltmann, C., Andrade, M., Koch, D., dan Grathwohl, G. (2008). Cellular ceramics by direct foaming of emulsified ceramic powder suspensions, Vol. 91, No. 9, Hal. 2823–2829.
- Bhatt, A., Priyadarshini, S., Acharath Mohanakrishnan, A., Abri, A., Sattler, M., dan Techapaphawit, S. (2019). Physical, chemical, and geotechnical properties of coal fly ash: A global review. *Case Studies in Construction Materials*, Vol. 11, No. 2, Hal. 263–277.
- Chen, Y., Seyyedi, M., dan Clennell, B. (2024). Petrophysical recipe for in-situ CO₂ mineralization in basalt rocks. *Advances in Geo-Energy Research*, Vol. 11, No. 2, Hal. 152–160.
- Chindaprasirt, P dan Rattanasak, U. (2023). Calcium wastes as an additive for a low calcium fly ash geopolymer. *Scientific Reports*, Vol. 13, No. 1, Hal. 1–

12.

- Dobiszewska, M., dan Beycioğlu, A. (2020). Physical properties and microstructure of concrete withwaste basalt powder addition. *Materials*, Vol. 13, No. 16, Hal. 3503–3521.
- Hadagali, B., Kulkarni, V., Krishna, M., dan Banad, C. (2025). Experimental investigation of mechanical properties of glass and basalt fiber reinforced with SiO_2 nanoparticles. *Proceedings of International Conference on Advanced Materials, Manufacturing and Sustainable Development (ICAMMSD-2024)*, Vol. 257, No. 1, Hal. 551–559.
- Hendronursito, Y., Saputra, A. A., Rajaguguk, T. O., Sumardi, S., Supriyatna, Y. I., Isnugroho, K., Birawidha, D. C., dan Amin, M. (2021). Pengaruh sintering serbuk batuan basalt sebagai bahan penguat pada komposit polyester terhadap sifat fisik dan mekanik. *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 12, No. 2, Hal. 391–399.
- Huo, Y., Qin, G., Huo, J., Zhang, X., Guo, B., Zhang, K., Li, J., Kang, M., dan Zou, Y. (2020). Crystallization kinetics of modified basalt glass. *Materials*, Vol. 13, No. 21, Hal. 1–12.
- Inkson, B. J. (2016). *Scanning Electron Microscopy (SEM) and Transmission Electron Microscopy (TEM) for Materials Characterization*. Woodhead Publishing, Hal. 17–43.
- Isnugroho, K., Hendronursito, Y., dan Asmi, D. (2023). Chemistry education study program. *Jurnal Kimia dan Pendidikan Kimia*, Vol. 8, No. 2, Hal. 171–186.
- Jiang, K., Xia, M., Tang, Y., Xu, Y., Deng, T., Li, B., dan Chen, W. (2023). Formation of closed pore structure in $\text{CaO}-\text{MgO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (CMAS) porous glass-ceramics via Fe_2O_3 modified foaming for thermal insulation. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 43, No. 4. Hal. 1689–1697.
- Kamid, T. S., Subagia, I.D.A., dan Wirawan, I. K. G. (2019). Karakteristik Komposit Hibrida Serat Basalt – Karbon Epoksi Resin pada Perendaman Air Laut. *Jurnal METTEK*, Vol. 5, No. 1, Hal. 57–65.
- Kostrzewska-Demczuk, P., Stepien, A., Dachowski, R., dan Silva, R. B. da. (2023). Influence of waste basalt powder addition on the microstructure and mechanical properties of autoclave brick. *Materials*, Vol. 16, No. 2, Hal. 1–23.
- Kristály, F., Szabó, R., Mádai, F., Debreczeni, Á., dan Mucsi, G. (2021). Lightweight composite from fly ash geopolymers and glass foam. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, Vol. 10, No. 1, Hal. 1–22.
- Kumar, G. N., dan Gundabattini, E. (2022). Investigation of supercritical power plant boiler combustion process optimization through cfd and genetic algorithm methods. *Energies*, Vol. 15, No. 23, Hal. 1–28.
- Kwek, S. Y., Awang, H., dan Cheah, C. B. (2021). Influence of liquid-to-solid and

- alkaline activator (Sodium silicate to sodium hydroxide) ratios on fresh and hardened properties of alkali-activated palm oil fuel ash geopolymers. *Materials*, Vol. 14, No. 15, Hal. 1–18.
- Li, W., Xu, C., Xie, A., Chen, K., Yang, Y., Liu, L., dan Zhu, S. (2021). Microstructure study of phase transformation of quartz in potassium silicate glass at 900°C and 1000°C. *Crystals*, Vol. 11, No. 12, Hal. 1–13.
- Lu, J., Lu, Z., Peng, C., Li, X., dan Jiang, H. (2014). Influence of particle size on sinterability, crystallisation kinetics and flexural strength of wollastonite glass-ceramics from waste glass and fly ash. *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 148, No. 2, Hal. 449–456.
- Ma, Q., dan Zhu, Y. (2017). Experimental research on the microstructure and compressive and tensile properties of nano-SiO₂ concrete containing basalt fibers. *Underground Space (China)*, Vol. 2, No. 3, Hal. 175–181.
- Ni, Y., Hu, S., Meng, H., Wang, J., Li, H., Zhou, H., Ma, X., dan Zhou, H. (2022). Experimental research on fully burning high-alkali coal in a 300 MW boiler with slag-tap furnace. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, Vol. 17, No. 5, Hal. 1–15.
- Osfouri, M., dan Simon, A. (2023). Study on the thermal conductivity and density of foam glass. *Pollack Periodica*, Vol. 18, No. 1, Hal. 126–131.
- Owoeye, S. S., Matthew, G. O., Ovienmhanda, F. O., dan Tunmilayo, S. O. (2020). Preparation and characterization of foam glass from waste container glasses and water glass for application in thermal insulations. *Ceramics International*, Vol. 46, No. 8, Hal. 11770–11775.
- Paunescu, L., Axinte, S. M., dan Cosmulescu, F. (2021a). Cellular glass manufactured by microwave irradiation of residual glass, eggshell and borax. *Journal La Multiapp*, Vol. 2, No. 5, Hal. 37–46.
- Paunescu, L., Axinte, S. M., dan Cosmulescu, F. (2021b). Unconventionally Made-Cellular Glass Aggregate. *Journal La Multiapp*, Vol. 2, No. 6, Hal. 21–31.
- Rashad, A. M. (2015). A brief on high-volume class F fly ash as cement replacement – A guide for Civil Engineer. *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 4, No. 2, Hal. 278–306.
- Rasmus, J., Ohenoja, K., Oksanen, J., Adesanya, E., Kinnunen, P., dan Illikainen, M. (2023). Alternative alkali activator from pulp mill waste – One-part blast furnace slag mortar activated with recovery boiler fly ash. *Journal of Building Engineering*, Vol. 76, No. 2, Hal. 107–113.
- Reyes, A. R., Corral, G. H., Casanova, E. O., Mandujano, H. A. T., dan Herrera, U. C. (2020). Development and validation of an x-ray imaging detector for digital radiography at low resolution. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, Vol. 7, No. 2, Hal. 181–187.
- Sembiring, S., Riyanto, A., Situmeang, R., dan Sembiring, Z. (2019). Bituminous

- composite comprising amorphous silica from rice husks. *Ceramics - Silikaty*, Vol. 63, No. 3, Hal. 277–286.
- Shimamura, A. (2022). A review on gradient macroporous ceramic via powder-based direct foaming process. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 130, No. 2, Hal. 204–210.
- Sihombing, A. J., Fadli, A., dan Bahruddin. (2016). Pembuatan foam glass menggunakan limbah pecahan kaca dan abu terbang (fly ash) dari pabrik sawit. *Jom FTEKNIK*, Vol. 3, No. 1, Hal. 1–7.
- Singha, K. (2012). A short review on basalt fiber. *International Journal of Textile Science*, Vol. 1, No. 4, Hal. 19–28.
- Stevens, A. H., Childers, D., Fox-Powell, M., Nicholson, N., Jhoti, E., dan Cockell, C. S. (2019). Growth, viability, and death of planktonic and biofilm *sphingomonas desiccabilis* in simulated martian brines. *Astrobiology*, Vol. 19, No. 1, Hal. 87–98.
- Sukmana, I., Risano, A. Y. E., Tarkono, dan Hendronursito, Y. (2023). The effect of time and crystallization temperature on the mechanical and physical properties of basalt scoria glass-ceramics (BGCs). *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2601, No. 1, Hal. 1–16.
- Wang, H., Chen, Z., Ji, R., Liu, L., dan Wang, X. (2018). Integrated utilization of high alumina fly ash for synthesis of foam glass ceramic. *Ceramics International*, Vol. 44, No. 12, Hal. 13681–13688.
- Xiao, J., Song, Y., dan Li, Y. (2023). Comparison of quantitative x-ray diffraction mineral analysis methods. *Minerals*, Vol. 13, No. 4, Hal. 1–15.
- Xu, C. yang, Wang, C., Xu, R. ze, Zhang, J. liang, dan Jiao, K. xin. (2021). Effect of Al_2O_3 on the viscosity of $CaO-SiO_2-Al_2O_3-MgO-Cr_2O_3$ slags. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, Vol. 28, No. 5, Hal. 797–803.
- Zhang, W. Y., Gao, H., dan Xu, Y. (2011). Sintering and reactive crystal growth of diopside-albite glass-ceramics from waste glass. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 31, No. 9, Hal. 1669–1675.
- Zygmunt-Kowalska, B., Pielichowska, K., Trestka, P., Ziabka, M., dan Kuźnia, M. (2022). The effect of ash silanization on the selected properties of rigid polyurethane foam/coal fly ash composites. *Energies*, Vol. 15, No. 6, Hal. 1–15.