

**PERAN VARIASI TEMPERATUR PEMBAKARAN SERTA KOMPOSISI
BASAL DAN SILIKA GEOTHERMAL SEBAGAI *RAW MATERIAL*
CELLULAR GLASS CERAMIC MENGGUNAKAN METODE *DIRECT*
*FOAMING***

Skripsi

Oleh

MENTARI KIRANA NARISWARI

NPM 2017041002



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

2025

ABSTRAK

PERAN VARIASI TEMPERATUR PEMBAKARAN SERTA KOMPOSISI BASAL DAN SILIKA GEOTHERMAL SEBAGAI *RAW MATERIAL* *CELLULAR GLASS CERAMIC* MENGGUNAKAN METODE *DIRECT* *FOAMING*

Oleh

MENTARI KIRANA NARISWARI

Telah dilakukan sintesis komposit *cellular glass ceramic* menggunakan bahan baku basal dan silika geothermal dengan variasi temperatur pembakaran linear dan non-linear dan komposisi untuk mengkaji pengaruhnya terhadap pembentukan fasa kristalin, morfologi pori, serta sifat mekanis dan sifat fisis. Komposisi yang digunakan adalah rasio basal dan silika geothermal (30%:70%, 50%:50%, dan 70%:30%) dengan temperatur linear (400°C, 700°C, dan 880°C) dan non-linear (400°C, 880°C, 700°C).

Karakterisasi dilakukan menggunakan STA, XRD, XRF, dan SEM, serta pengujian kuat tekan, densitas, dan porositas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur pembakaran linear menghasilkan distribusi pori yang lebih merata, sedangkan non-linear menghasilkan fasa kristalin yang lebih teratur pada temperatur tinggi. Secara keseluruhan, komposisi CG30/70-L dan CG50/50-L memberikan kombinasi terbaik antara isolasi termal, kuat tekan, densitas, porositas, dan struktur kristalin yang stabil.

CG30/70-L didominasi oleh SiO₂ (40,96%), Fe₂O₃ (26,86%), dan CaO (13,78%), dengan fasa utama *halite*, *anorthite*, dan *albite*. Material ini memiliki kuat tekan 35,98 MPa, densitas 1,12 g/cm³, dan porositas 75%. Ukuran pori berkisar 50-100 µm, mendukung isolasi termal yang baik. CG50/50-L didominasi oleh SiO₂ (54,66%), ZnO (3,431%), dan Cl (22,80%), dengan fasa utama *halite*, *augite*, dan *albite*. Kuat tekan 12,25 MPa, densitas 1,22 g/cm³, dan porositas 68%. Ukuran pori 80-150 µm. CG30/70-L lebih cocok untuk aplikasi isolasi termal dan ketahanan tekanan tinggi, sementara CG50/50-L lebih baik untuk aplikasi pada temperatur tinggi.

Kata Kunci: komposit, *cellular glass ceramic*, basal, silika geothermal.

ABSTRACT

THE EFFECT OF FIRING TEMPERATURE VARIATION, BASALT COMPOSITION, AND GEOTHERMAL SILICA AS RAW MATERIALS FOR CELLULAR GLASS CERAMICS USING THE DIRECT FOAMING METHOD

By

MENTARI KIRANA NARISWARI

The synthesis of cellular glass ceramic composites was carried out using basalt and geothermal silica as raw materials with variations in firing temperatures (linear and non-linear) and compositions to examine their effects on crystalline phase formation, pore morphology, and mechanical and physical properties. The compositions used were basalt and geothermal silica ratios of (30%:70%, 50%:50%, and 70%:30%) with linear temperatures (400°C, 700°C, and 880°C) and non-linear temperatures (400°C, 880°C, 700°C).

Material characterization was performed using STA, XRD, XRF, and SEM, along with mechanical testing for compressive strength, density, and porosity. The results showed that linear firing temperatures produced more uniform pore distribution, while non-linear firing resulted in more regular crystalline phases at higher temperatures. Overall, the compositions CG30/70-L and CG50/50-L provided the best combination of thermal insulation, compressive strength, density, porosity, and stable crystalline structure.

CG30/70-L was dominated by SiO₂ (40.96%), Fe₂O₃ (26.86%), and CaO (13.78%), with the main phases being halite, anorthite, and albite. This material had a compressive strength of 35.98 MPa, density of 1.12 g/cm³, and porosity of 75%. The pore size ranged from 50-100 µm, supporting good thermal insulation. CG50/50-L was dominated by SiO₂ (54.66%), ZnO (3.431%), and Cl (22.80%), with the main phases being halite, augite, and albite. It had a compressive strength of 12.25 MPa, density of 1.22 g/cm³, and porosity of 68%. The pore size ranged from 80-150 µm. CG30/70-L is more suitable for thermal insulation and high pressure applications, while CG50/50-L is better for high-temperature applications.

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

**PERAN VARIASI TEMPERATUR PEMBAKARAN SERTA KOMPOSISI
BASAL DAN SILIKA GEOTHERMAL SEBAGAI *RAW MATERIAL*
CELLULAR GLASS CERAMIC MENGGUNAKAN METODE *DIRECT*
*FOAMING***

Oleh

Mentari Kirana Nariswari

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**

Thesis Title : THE EFFECT OF FIRING TEMPERATURE
VARIATION, BASALT COMPOSITION,
AND GEOTHERMAL SILICA AS RAW
MATERIALS FOR CELLULAR GLASS
CERAMICS USING THE DIRECT
FOAMING METHOD

Student Name : **Mentari Kirana Nariswari**

Student Identification : 2017041002

Number

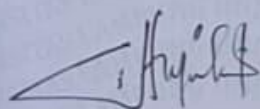
Study Program : Physics

Faculty : Mathematics and Natural Sciences

APPROVED

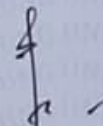
1. Advisory Committee

Advisor I



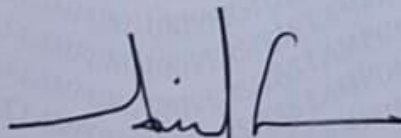
Suprihatin, S.Si., M.Si.
NIP. 197304141997022001

Advisor II



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

2. Head of the Department of Physics

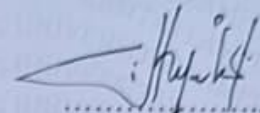


Arif Surtono S.Si., M.Si., M.Eng.
NIP. 197109092000121001

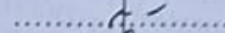
VALIDATED

1. Examination Team

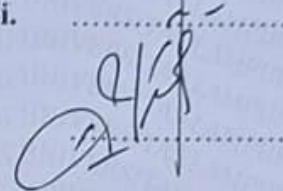
Chair : **Suprihatin, S.Si., M.Si.**



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



Examiner : **Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.**
(non-Adviser)



2. Dean of the Faculty of Mathematics and Natural Sciences

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

NIP. 197110012005011002

Date of Thesis Examination Completion: August 6 2025

STATEMENT

I hereby declare that this thesis does not contain any work derived from others, and to the best of my knowledge, no opinions or writings from others are used, except those clearly cited in the reference list. I also declare that this thesis is entirely my own work.

Should any of my statements be found to be untrue, I am willing to accept sanctions in accordance with the applicable law.

Bandar Lampung, August 6 2025



Mentari Kirana Nariswari

NPM. 2017041002

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Mentari Kirana Nariswari dengan nama panggilan Tata, dilahirkan pada tanggal 28 Juli 2002 di Bandar Lampung. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Rizal Putra Erlando, S.P. dan Ibu Laksmi Diana Sari, S.E. Pendidikan formal yang telah ditempuh oleh penulis dimulai dari Sekolah Dasar Negeri 1 Beringin Raya (lulus tahun 2014), dilanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama

Negeri 2 Bandar Lampung (lulus tahun 2017), dan Sekolah Menengah Atas Negeri 7 Bandar Lampung (lulus tahun 2020).

Pada tahun 2020, penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN. Pada tahun 2023, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PT Perkebunan Nusantara VII (PTPN 7) dengan judul “Uji Kadar Sukrosa pada Getah Karet Alam (*Hevea brasiliensis*) Menggunakan Metode Lateks Diagnosis (LD) di PTPN VII Bandar Lampung.” Penulis juga berpartisipasi dalam program Kuliah Kerja Nyata (KKN) di Desa Sukawaringin, Kecamatan Bangun Rejo, Kabupaten Lampung Tengah. Selama menempuh pendidikan, penulis aktif menjadi anggota Paduan Suara Mahasiswa Universitas Lampung pada tahun 2020-2021 dan pengurus Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) di bidang Minat dan Bakat 2021-2022, serta menjadi *Research Assistant* di BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan periode 2024-2025.

Penulis melakukan penelitian di Laboratorium *Pilot Plant* Hidrometalurgi Pusat Riset Teknologi Pertambangan-Badan Riset dan Inovasi Nasional (PRTP-BRIN) Tanjung Bintang, Lampung Selatan, dengan judul “Peran Variasi Temperatur Pembakaran serta Komposisi Basal dan Silika Geothermal Sebagai *Raw Material Cellular Glass Ceramic* Menggunakan Metode *Direct Foaming*.”

MOTTO

“Never be so kind, you forget to be clever. Never be so clever, you forget to be kind.”

(Taylor Swift)

“Never be ashamed of trying, effortlessness is myth.”

(Taylor Swift)

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini dipersembahkan kepada:

Kedua orang tua tercinta

Papa Rizal Putra Erlando, S.P. dan Mama Laksmi Diana Sari, S.E.

yang selalu memberikan do'a, cinta, dan dukungan tanpa batas. Terima kasih telah menjadi sumber kekuatan dan inspirasi, serta selalu mendorong Tata untuk terus berjuang meraih impian-impian Tata.

Kedua adik tersayang

Jelita Kanaya Maheswari dan Bintang Nayaka Daniswara

yang selalu memberikan keceriaan dan dukungan yang tak terhingga. Terima kasih telah menjadi teman sejati yang selalu menemani setiap langkah, membawa kebahagiaan, dan memberikan semangat di setiap perjalanan.

Teman-teman tercinta.

yang selalu memberikan dukungan dan semangat tanpa henti. Terima kasih telah menjadi bagian penting dalam perjalanan ini.

Almamater Tercinta

Universitas Lampung

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala nikmat, kesehatan, dan rahmat-Nya, yang telah memudahkan proses penulis untuk menyelesaikan skripsi ini dengan judul **“Peran Variasi Temperatur Pembakaran serta Komposisi Basal dan Silika Geothermal sebagai *Raw Material Cellular Glass Ceramic* Menggunakan Metode *Direct Foaming*.”** Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin mengucapkan terima kasih 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 sekaligus Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan nasihat, bimbingan, dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan di Jurusan Fisika.
4. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan arahan, saran, motivasi, pengetahuan, dan nasihat berharga kepada penulis selama proses penelitian dan penulisan skripsi.
5. Bapak David Candra Birawidha, S.T., M.Si. sebagai Dosen Pembimbing Kedua yang telah memberikan arahan, saran, masukan, dan bimbingan yang sangat berarti selama proses penelitian dan penulisan skripsi.
6. Ibu Dra. Dwi Asmi M.Si., Ph.D. sebagai Dosen Penguji yang telah bersedia memberikan masukan dan saran yang membangun bagi penulis.
7. Seluruh Dosen Jurusan Fisika yang telah memberikan ilmu dan pengalaman berharga selama penulis menempuh studi di Fisika FMIPA Universitas Lampung.

8. Staf dan karyawan Jurusan Fisika yang telah membantu dan memenuhi kebutuhan administrasi penulis dengan penuh kesabaran.
9. Teman-teman seperjuangan penulis: Rana Yuliandra, Devi Mariska Putri, Irma Yulianti, Shinta Amalia Paradita, Ati Laila Kamila dan Ika Winarti yang telah banyak membantu, menemani, memberikan semangat, dan menjadi tempat berkeluh kesah selama proses ini.
10. Teman-teman semasa SMA yang masih sering berkumpul dan bermain bersama: Alza Abyuliaani, Rizki Lutfiani, dan Katralin, yang selalu memberikan keceriaan dan dukungan sepanjang perjalanan ini.
11. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2020 dan seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT senantiasa memberikan balasan yang terbaik atas segala kebaikan yang telah diberikan oleh semua pihak kepada penulis.

Bandar Lampung, 06 Agustus 2025

Mentari Kirana Nariswari

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	iv
DAFTAR GAMBAR.....	v
I. PENDAHULUAN	19
1.1 Latar Belakang	8
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 Poliuretan (PU)	9
2.5 Metode <i>Direct Foaming</i>	10
2.6 Pengaruh Temperatur Pembakaran dalam Pembentukan <i>Cellular Glass Ceramic</i>	11
2.7 Karakterisasi dan Pengujian.....	12
2.7.1 <i>Simultaneous Thermal Analysis</i> (STA).....	12
2.7.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	13
2.7.3 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	15
2.7.4 <i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	16
2.7.5 Kuat Tekan.....	17
2.7.6 Densitas.....	18
2.7.7 Porositas.....	18
III. METODE PENELITIAN.....	20
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	20
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	20
3.2.1 Alat.....	20
3.2.2 Bahan.....	21
3.3 Prosedur Penelitian	21

3.3.1 Preparasi Bahan.....	21
3.3.2 Pembuatan Material	21
3.3.3 Karakterisasi.....	23
3.3.4 Pengujian Material	24
3.4 Diagram Alir	25
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	27
4.1 Hasil Karakterisasi Bahan Baku <i>Cellular Glass Ceramic</i>	27
4.1.1 Hasil Karakterisasi XRD Basal dan Silika Geothermal	27
4.1.2 Hasil Karakterisasi XRF Basal dan Silika Geothermal.....	29
4.2 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i>	30
4.2.2 Hasil Karakterisasi XRD pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	32
4.2.3 Hasil Karakterisasi XRF pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	42
4.3.3 Hasil Karakterisasi SEM pada <i>Cellular Glass Ceramic</i>	44
4.4 Hasil Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis <i>Cellular Glass Ceramic</i>	51
4.4.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Cellular Glass Ceramic</i>	51
4.4.2 Hasil Pengujian Densitas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	53
4.4.3 Hasil Pengujian Porositas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	54
4.5 Hubungan Masing-Masing Karakterisasi dan Uji terhadap <i>Cellular Glass</i>	55
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	57
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran	58
DAFTAR PUSTAKA.....	59
LAMPIRAN.....	65

DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Fasa basal.....	27
2. Fasa silika geothermal.....	28
3. Hasil Karakterisasi XRF Basal dan Silika Geothermal.	29
4. Fasa CG30/70.....	33
5. Fasa CG30/70-L.....	34
6. Fasa CG30/70-NL.....	35
7. Fasa CG50/50.....	36
8. Fasa CG50/50-L.....	37
9. Fasa CG50/50-NL.....	38
10. Fasa CG70/30.....	39
11. Fasa CG70/30-L.....	40
12. Fasa CG70/30-NL.....	41
13. Hasil Karakterisasi XRF pada cellular glass ceramic.	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. <i>Cellular glass ceramic</i>	7
2. Batu basal.....	8
3. Silika geotermal.	9
4. Poliuretan dalam kemasan.	10
5. Skema metode <i>direct foaming</i>	11
6. Difraksi sinar-X.	14
7. Prinsip kerja XRF.	16
8. Ilustrasi prinsip kerja SEM.	17
9. Grafik temperatur <i>cellular glass ceramic</i>	23
10. Diagram alir Penelitian.	25
11. Difraktogram (a) Basal (b) Silika Geothermal.....	27
12. Grafik STA <i>cellular glass ceramic</i>	31
13. Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> sampel 30/70.....	33
14. Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> sampel 50/50.....	36
15. Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> sampel 70/30.....	39
16. Morfologi material makro, perbesaran 1000 kali skala 100 μm secara BSE dan grafik ukuran pori (a) CG30/70-L dan (b) CG30/70-NL.	44
17. Morfologi material makro, perbesaran 1000 kali skala 100 μm secara BSE dan grafik ukuran pori (a) CG50/50-L dan (b) CG50/50-NL.	46
18. Morfologi material makro perbesaran 1000 kali skala 100 μm secara BSE dan grafik ukuran pori (a) CG70/30-L dan (b) CG70/30-NL.	48
19. Pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi <i>raw material</i> terhadap (a) CG 30/70-L dan (b) CG30/70-NL.	50
20. Pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi <i>raw material</i> terhadap (a) CG 50/50-L dan (b) CG50/50-NL.	50

21. Pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi <i>raw material</i> terhadap (a) CG 70/30-L dan (b) CG70/30-NL	50
22. Hasil pengujian kuat tekan <i>cellular glass ceramic</i>	52
23. Hubungan variasi komposisi bahan dan variasi temperatur terhadap densitas <i>cellular glass ceramic</i>	53
24. Hubungan variasi komposisi bahan dan variasi temperatur terhadap porositas <i>cellular glass ceramic</i>	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan teknologi material yang semakin pesat, kesadaran akan pentingnya penggunaan bahan konstruksi yang ramah lingkungan telah mendapat perhatian lebih dibandingkan dengan sebelumnya. Masyarakat dunia kini semakin menghargai pentingnya memilih material yang tidak hanya memenuhi kebutuhan konstruksi, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan. Oleh karena itu, salah satu pendekatan yang menarik perhatian adalah pemanfaatan basal dan silika geotermal sebagai bahan utama dalam proses pembuatan *cellular glass ceramic* dengan menggunakan metode *direct foaming* (Hassan dkk., 2024).

Batu basal merupakan tipe batuan beku yang terbentuk melalui proses pendinginan dan pembekuan lava di permukaan bumi. Batuan ini termasuk dalam kategori batuan beku ekstrusif atau dikenal sebagai batuan beku vulkanik. Pembentukan batu basal terjadi ketika lava cair naik ke permukaan dari dalam kerak bumi dan mengalami pendinginan cepat, menyebabkan pembekuan dan terbentuknya batu basal (Yuliansyah dan Sujatmiko, 2019). Batu basal dapat memiliki struktur yang beragam, tetapi seringkali memiliki struktur amorf atau tidak teratur. Batu basal juga dapat menunjukkan tekstur berlapis akibat proses pembekuan yang cepat. Batu basal memiliki kegunaan sebagai bahan konstruksi, pondasi bangunan (gedung) dan jembatan. Penambahan batu basal dapat meningkatkan kekuatan tekan beton secara signifikan, selain itu batu basal memiliki kelebihan diantaranya daya tahan yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan umur panjang sehingga membuatnya ideal untuk berbagai proyek konstruksi termasuk beton. Namun batu basal memiliki kelemahan karena batu basal sulit untuk diolah dan dipotong akibat tingkat kekerasannya yang tinggi. Kekakuan batu basal juga membuatnya rentan

terhadap retakan saat terkena tekanan ekstrem, dan densitasnya yang tinggi membatasi penggunaannya dalam aplikasi yang memerlukan material ringan (Rajiman dan Ningrum, 2019).

Silika geotermal adalah produk sampingan dari sumber air panas geotermal. Penggunaannya dalam material isolasi termal dapat meningkatkan efisiensi dan mendukung pemanfaatan sumber daya alam yang berkelanjutan (Riyanto dkk., 2012). Silika geotermal diperoleh dari air panas bumi atau sumber air geotermal yang berada di daerah dengan aktivitas geotermal, seperti mata air panas dan kolam panas. Silika ini adalah silika amorf dengan pori-pori ukuran meso, yang berdiameter antara 2 hingga 50 nanometer (Silviana, 2020).

Silika dengan ukuran pori meso banyak digunakan karena potensi penggunaannya yang luas, termasuk dalam mengatasi kontaminan air limbah. Silika geotermal efektif sebagai adsorben untuk menghilangkan zat pencemar dari air limbah, berkat pori-porinya yang meningkatkan efisiensi penyerapan, menjadikannya solusi potensial untuk pengolahan air limbah yang lebih efektif (Silviana dkk., 2022).

Dalam konteks konstruksi, silika geotermal dapat digunakan sebagai bahan tambahan dalam pembuatan bata ringan dan material bangunan. Penggunaannya bertujuan untuk meningkatkan sifat mekanis dan ketahanan terhadap api dari produk akhir tersebut. Dengan menambahkan silika geotermal, bata ringan dan material konstruksi lainnya dapat memperoleh kekuatan mekanis yang lebih baik dan tingkat ketahanan terhadap temperatur tinggi, menjadikannya pilihan yang baik untuk aplikasi konstruksi yang membutuhkan material ringan dan tahan api (Salim dkk., 2019).

Silika geotermal memiliki daya absorpsi yang tinggi, terutama karena struktur porinya yang berukuran meso. Pori-pori berukuran meso ini meningkatkan luas permukaan material, sehingga memungkinkan silika geotermal untuk menyerap dan menahan sejumlah besar zat, termasuk kontaminan dari air limbah. Meskipun memiliki kemampuan penyerapan air, silika geotermal mungkin tidak seefisien beberapa jenis adsorben lainnya dalam menghilangkan kontaminan tertentu dari air limbah. Sehingga pemilihan jenis adsorben yang lebih cocok untuk kondisi spesifik dapat meningkatkan efektivitas proses penghilangan kontaminan dan

meminimalkan dampak lingkungan yang timbul. Kemudian proses ekstraksi dan pengolahan silika geotermal dapat memiliki dampak lingkungan jika tidak dikelola baik. Limbah atau residu produksi dapat menimbulkan masalah lingkungan jika tidak diatasi dengan tepat. Biaya produksi silika geotermal juga dapat dikatakan tinggi, terutama jika diperoleh dari lokasi geotermal yang sulit diakses (Sauni dkk., 2022).

Menyatukan basal dan silika geotermal dalam pembuatan *cellular glass ceramic* menggunakan metode *direct foaming*, dapat menciptakan sebuah terobosan dalam industri konstruksi. *Cellular glass ceramic*, yang juga dikenal sebagai kaca berpori, merupakan suatu materi ringan yang memiliki struktur sel yang rapat, memberikan keuntungan baik dari segi termal maupun kekuatan (Fernandes dkk., 2009). Kombinasi kedua bahan ini diharapkan dapat memberikan ciri khas yang unik pada *cellular glass ceramic*, menjadikannya sebuah solusi konstruksi yang tidak hanya inovatif, tetapi juga ramah lingkungan. Dipilihnya metode *direct foaming* pada pembuatan *cellular glass ceramic* adalah karena metode ini memungkinkan pembentukan *cellular glass ceramic* dengan cepat, dengan hanya mencampurkan bahan-bahan dasar dan kemudian menghasilkan busa langsung tanpa memerlukan langkah-langkah yang memakan waktu. Selain itu metode ini memberikan kontrol yang baik terhadap struktur *cellular glass ceramic* atau pori-pori yang terbentuk (Peyrton dan Avérous, 2021).

Penelitian ini dilaksanakan untuk memahami pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi basal serta silika geotermal terhadap sifat fisis dan mekanik *cellular glass ceramic*. Penelitian ini melibatkan variasi temperatur linear (400°C, 700°C, dan 880°C) dan temperatur non-linear (400°C, 880°C, dan 700°C) yang telah ditentukan oleh proses karakterisasi *Simultaneous Thermal Analysis* (STA) serta komposisi bahan baku dengan perbandingan 30%:70%, 50%:50%, dan 70%:30% hasil sintesis dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) diikuti dengan pengujian kuat tekan, porositas, dan densitas.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimanakah pengaruh karakterisasi *Simultaneous Thermal Analysis* (STA) dalam menentukan temperatur yang tepat untuk pembakaran *cellular glass ceramic*?
2. Bagaimanakah pengaruh variasi temperatur pembakaran serta komposisi bahan terhadap komposisi kimia dan fasa yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* melalui metode *direct foaming* berdasarkan hasil karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF)?
3. Bagaimana pengaruh variasi temperatur pembakaran dan variasi komposisi bahan terhadap morfologi yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* berdasarkan hasil karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)?
4. Bagaimanakah pengaruh variasi temperatur pembakaran serta komposisi bahan terhadap sifat fisis dan sifat mekanis (kuat tekan, densitas dan porositas) pada pembentukan *cellular glass ceramic*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh karakterisasi *Simultaneous Thermal Analysis* (STA) terhadap penentuan temperatur pembakaran *cellular glass ceramic*.
2. Mengetahui pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi bahan yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* melalui metode *direct foaming* dengan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD) dan *X-Ray Fluorescence* (XRF).
3. Mengetahui pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi bahan terhadap morfologi terbentuk pada *cellular glass ceramic* melalui metode *direct foaming* dengan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM).
4. Mengetahui pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi bahan terhadap sifat fisis dan sifat mekanis (kuat tekan, densitas, dan porositas) pada pembentukan *cellular glass ceramic* melalui metode *direct foaming*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada 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, Jawa Timur.
3. NaOH sebagai matriks yang digunakan sebanyak 3M.
4. Poliuretan A (*Polyol*) dan B (*Isocyanate*) yang digunakan sebanyak 40% dari massa total.
5. Karakterisasi dilakukan menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD), *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM). Pengujian material meliputi kuat tekan, porositas, dan densitas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Dapat mengetahui pengaruh variasi temperatur pembakaran dan komposisi basal serta silika geotermal terhadap pembentukan *cellular glass ceramic* melalui *metode direct foaming*.
2. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Unila dalam bidang Fisika Material.
3. Sebagai tambahan referensi peneliti selanjutnya dalam bidang *cellular glass ceramic*.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Cellular Glass Ceramic*

Cellular glass ceramic adalah material berpori yang terbuat dari bahan-bahan seperti silika, basal, atau batu apung, dan dikenal karena sifat isolasi termal yang unggul. Struktur porinya, yang terisi udara atau gas, memberikan kombinasi unik antara kekuatan, porositas, dan ketahanan terhadap temperatur tinggi, sehingga *cellular glass ceramic* sangat cocok untuk aplikasi yang memerlukan perlindungan termal dan kekuatan struktural. Material ini juga sangat fleksibel, memungkinkan pembentukan sesuai kebutuhan spesifik dalam berbagai industri. Inovasi dalam metode pembuatan dan pengembangan aplikasi baru terus meningkatkan penggunaan *cellular glass ceramic* dalam berbagai aplikasi industri modern (Rincón dkk., 2016).

Cellular glass ceramic banyak digunakan dalam industri bangunan, kimia, dan aplikasi tahan api karena sifatnya yang sesuai untuk berbagai kebutuhan konstruksi dan teknik (Fernandes dkk., 2009). Dalam industri kimia, kaca seluler dapat berfungsi sebagai katalis, sensor, dan fotokatalis. Dalam industri konstruksi, *cellular glass ceramic* digunakan sebagai material ringan dengan sifat isolasi termal yang baik. Di bidang lingkungan, *cellular glass ceramic* dapat bertindak sebagai adsorben untuk membersihkan air atau udara dari polutan (Jang dkk., 2006).

Dengan sifat isolasi termal yang unggul, kekuatan struktural yang baik, dan kemampuan untuk dibentuk sesuai kebutuhan, kaca seluler terus menjadi pilihan menarik di berbagai industri. Inovasi dalam proses pembuatan dan penemuan aplikasi baru terus mendorong perkembangan dan pemanfaatan material ini. *Cellular glass ceramic* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 *Cellular glass ceramic*

2.2 Batu Basal

Batu basal adalah batuan beku yang dapat ditemukan di hampir seluruh wilayah Indonesia (Yuliansyah dan Sujatmiko, 2019). Material ini sangat berharga dalam industri konstruksi, digunakan untuk berbagai aplikasi seperti pondasi gedung, pembangunan jalan, dan jembatan, serta sebagai agregat penting dalam campuran beton dan aspal (Asis, 2018).

Batu basal dikenal karena kekerasan dan kepadatannya. Batuan ini terbentuk dari pembekuan magma di permukaan bumi dan memiliki tekstur halus dengan struktur yang padat dan keras (Al Muttaqii dkk., 2022). Batu basal biasanya berwarna abu-abu hingga hitam, batu basal juga memiliki tekstur afanitik, yang merupakan campuran dari mineral seperti piroksin, amfibol, plagioklas, dan gelas vulkanik. Ciri khas ini membuat batu basal sangat berguna dalam berbagai konteks geologi dan aplikasi industri (Leni dkk., 2019).

Dalam aplikasi konstruksi, batu basal tidak hanya digunakan sebagai bahan pondasi dan agregat untuk aspal dan beton, tetapi juga sebagai elemen dekoratif pada dinding, monumen, dan ubin lantai. Selain penggunaannya yang luas, batu basal

dapat digiling menjadi serbuk halus yang berfungsi sebagai bahan tambahan dalam pembuatan semen. Serbuk ini, ketika dicampurkan dalam pembuatan semen, dapat meningkatkan kualitas beton yang dihasilkan, menjadikannya kuat dan tahan lama (Rajiman dan Ningrum, 2019). Batu basal ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Batu basal

2.3 Silika Geotermal

Silika geotermal adalah jenis silika yang ditemukan dalam sumber air panas geotermal, yaitu air bawah tanah yang dipanaskan oleh panas bumi di kerak bumi. Ketika air ini mencapai permukaan, kondisinya sering kali sangat berbeda dari air tanah biasa dan dapat mengandung berbagai mineral, termasuk silika. Silika ini dapat mengendap saat temperatur menurun dan membentuk deposit mineral dalam bentuk amorf, yang tidak memiliki struktur kristal yang teratur, atau dalam bentuk kristalin, yang memiliki struktur kristal yang teratur (Riyanto dkk., 2012).

Dalam proses pembuatan *cellular glass ceramic*, penambahan silika geotermal dapat memberikan dampak signifikan terhadap sifat akhir material. Silika geotermal dapat meningkatkan ketebalan dinding sel dan kekuatan mekanis dari *cellular glass ceramic*, membuatnya lebih kuat dan tahan lama. Selain itu, silika ini dapat mempengaruhi konduktivitas termal, yang berperan penting dalam efisiensi isolasi termal material. Namun, penting untuk memperhatikan bahwa penambahan silika geotermal harus dilakukan dengan hati-hati, karena dapat memengaruhi proses sintering atau proses pemanasan yang mengikat partikel-partikel material serta struktur pori yang dihasilkan. Dengan perancangan yang cermat dan strategi integrasi yang tepat, silika geotermal dapat dimanfaatkan secara optimal dalam

pembuatan *cellular glass ceramic* untuk mencapai karakteristik dan kinerja yang diinginkan, serta untuk memenuhi berbagai kebutuhan aplikasi spesifik (Salim dkk., 2019). Silika geotermal ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Silika geotermal

2.4 Poliuretan (PU)

Poliuretan adalah material serbaguna karena sifatnya dapat sangat bervariasi dari lapisan lembut hingga bahan konstruksi yang sangat keras. Sintesis poliuretan merupakan contoh aplikasi reaksi polimerisasi kondensasi yang melibatkan reaksi antara isosianat dan polioliol. Reaksi kondensasi ini menghasilkan rantai polimer panjang dengan ikatan uretan yang memberikan elastisitas, ketahanan benturan, dan ketahanan terhadap zat kimia. Sifat-sifat ini membuat poliuretan sangat cocok untuk berbagai aplikasi, termasuk pembuatan busa, bahan pelapis, adhesif, cat, dan material tahan aus (Das dan Mahanwar, 2020).

Dalam struktur molekulnya, poliuretan memiliki gugus fungsi (-NHCOO-) yang memberikan karakteristik unik dan aplikasi luas dalam industri dan manufaktur (Rohaeti dan Hikmawati, 2010). Selain itu, poliuretan memiliki kemampuan untuk meningkatkan sifat resin epoksi, membuka peluang aplikasi industri yang lebih luas (Ghozali dkk., 2018).

Dalam bentuk busa, poliuretan dapat diklasifikasikan menjadi foam fleksibel, semi-kaku, atau kaku berdasarkan karakteristik mekaniknya dan tingkat kerapatannya. Poliuretan juga digunakan sebagai bahan elastomer, perekat, dan pelapis, menunjukkan kemampuannya untuk memperbaiki kelemahan dan meningkatkan

karakteristik material lainnya, menjadikannya solusi yang efektif dalam berbagai aplikasi industri (Gultom dan Hernawaty, 2019). Gambar Poliuretan (PU) dalam kemasan ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Poliuretan dalam kemasan

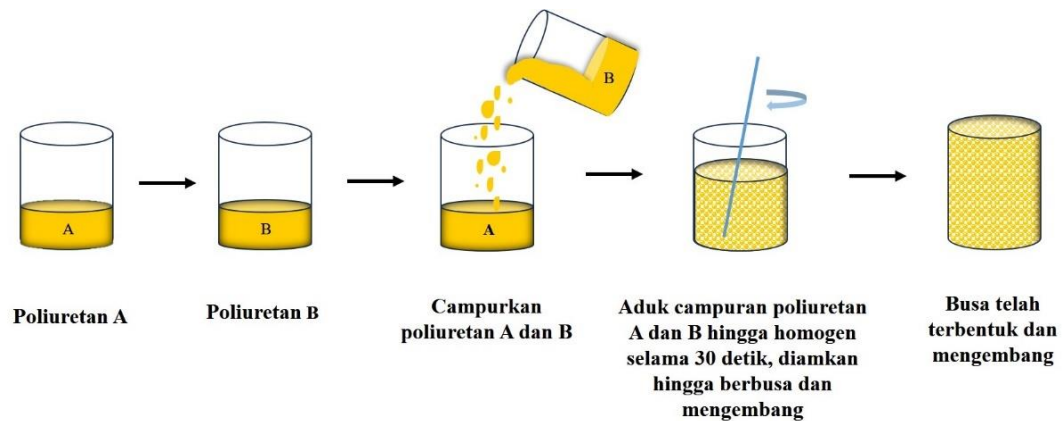
2.5 Metode *Direct Foaming*

Metode *direct foaming* adalah teknik di mana busa atau struktur berongga pada suatu material dibentuk langsung dalam proses produksi, tanpa memerlukan pembentukan busa terpisah atau penggunaan bahan tambahan sebagai agen pembentuk busa. Teknik ini biasanya melibatkan gas ke dalam material atau campurannya, yang menghasilkan pembentukan gelembung-gelembung gas dalam material tersebut, menciptakan struktur berongga atau busa. Metode ini sering diterapkan dalam berbagai aplikasi, termasuk pembuatan bahan pelapis dan bahan berpori dengan berbagai sifat dan kegunaan (Pokhrel dkk., 2013).

Proses *direct foaming* dimulai dengan memasukkan gas langsung ke dalam bahan, baik melalui injeksi langsung atau dengan menambahkan *foaming agent* yang menyebabkan reaksi kimia seperti dekomposisi atau presipitasi gas yang larut dalam fasa cair. Proses ini diatur oleh temperatur dan tekanan tertentu. Setelah itu, bahan dikeringkan dan dipanaskan pada temperatur tinggi (Colombo, 2006).

Dalam membuihkan bahan baku berbasis kaca, prinsip dasarnya adalah dengan memasukkan *foaming agent* ke dalam campuran serbuk halus. Campuran tersebut dipanaskan pada temperatur tinggi di mana kaca menjadi lembek dan viskositasnya cukup untuk menangkap produk gas yang dilepaskan melalui oksidasi atau

dekomposisi *foaming agent* (Paunescu dkk., 2021). Skema metode *direct foaming* ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Skema metode *direct foaming*

2.6 Pengaruh Temperatur Pembakaran dalam Pembentukan *Cellular Glass Ceramic*

Metode pembakaran dalam pembuatan *cellular glass ceramic* adalah proses kunci untuk menciptakan struktur berpori pada material tersebut. Dalam proses ini, serbuk kaca atau bahan baku kaca dicampur dengan agen pembentuk pori, kemudian dipanaskan pada temperatur tinggi hingga mencapai tahap sintering. Pada tahap ini, partikel-partikel kaca meleleh dan bergabung untuk membentuk struktur padat yang menangkap gelembung gas yang dihasilkan oleh agen pembentuk pori. Setelah mendingin, gelembung gas tetap terperangkap, menciptakan struktur berpori khas yang menjadi ciri dari *cellular glass ceramic* (Bernardo, 2007).

Temperatur pembakaran memainkan peran yang sangat penting dalam proses pembuatan *cellular glass ceramic* karena kemampuannya mengontrol penggabungan partikel kaca. Kontrol temperatur ini pada akhirnya memengaruhi ukuran dan distribusi pori dalam material akhir, yang merupakan aspek kritis dalam menentukan karakteristik material. temperatur pembakaran yang lebih tinggi cenderung menghasilkan pori yang lebih besar, memberikan material dengan struktur yang lebih terbuka dan ringan. Sebaliknya, temperatur yang lebih rendah cenderung menghasilkan pori yang lebih kecil dan struktur berpori yang lebih padat, menghasilkan material dengan densitas lebih tinggi.

Pengendalian temperatur pembakaran yang tepat dan teliti sangat esensial untuk memastikan *cellular glass ceramic* yang dihasilkan memiliki sifat-sifat yang sesuai dengan kebutuhan spesifik aplikasinya. Misalnya, untuk aplikasi yang memerlukan isolasi termal yang baik, diperlukan struktur berpori yang lebih besar untuk mengurangi konduktivitas termal. Sementara itu, untuk aplikasi yang menuntut kekuatan mekanis tinggi, struktur berpori yang lebih padat dan seragam lebih diinginkan. Dengan demikian, pemahaman yang mendalam tentang efek temperatur pembakaran dan kemampuan untuk mengendalikannya secara akurat adalah kunci dalam memproduksi *cellular glass ceramic* yang memenuhi spesifikasi teknis dan fungsional yang diharapkan (Saakyan dkk., 2019).

2.7 Karakterisasi dan Pengujian

2.7.1 *Simultaneous Thermal Analysis* (STA)

Simultaneous Thermal Analysis (STA) adalah teknik karakterisasi material yang menggabungkan dua metode analisis termal utama, yaitu *Thermogravimetric Analysis* (TGA) dan *Differential Scanning Calorimetry* (DSC), dalam satu sistem pengukuran. Melalui STA, perubahan massa dan perubahan kalor pada suatu material dapat diamati secara bersamaan saat material tersebut mengalami proses pemanasan, pendinginan, atau penahanan temperatur tertentu (Van Humbeeck, 1998).

Dalam TGA, perubahan massa diukur sebagai respons terhadap perubahan temperatur atau waktu, memberikan informasi penting mengenai peristiwa seperti dehidrasi, dekomposisi termal, oksidasi, dan penguapan komponen volatil. Sementara itu, DSC mengukur perubahan kalor yang menyertai transisi fasa, reaksi kimia, kristalisasi, peleburan, dan perubahan termal lainnya, baik yang eksotermik maupun endotermik.

Dengan menggabungkan kedua teknik ini, STA mampu memberikan gambaran yang lebih lengkap dan akurat tentang sifat termal dan stabilitas material. Informasi ini sangat penting untuk berbagai aplikasi, termasuk pengembangan material baru, analisis kegagalan, kontrol kualitas, serta studi reaksi kimia dan kinetika. STA juga

memungkinkan korelasi langsung antara peristiwa kehilangan massa dengan peristiwa perubahan kalor, sehingga mempermudah interpretasi data dan meningkatkan efisiensi analisis.

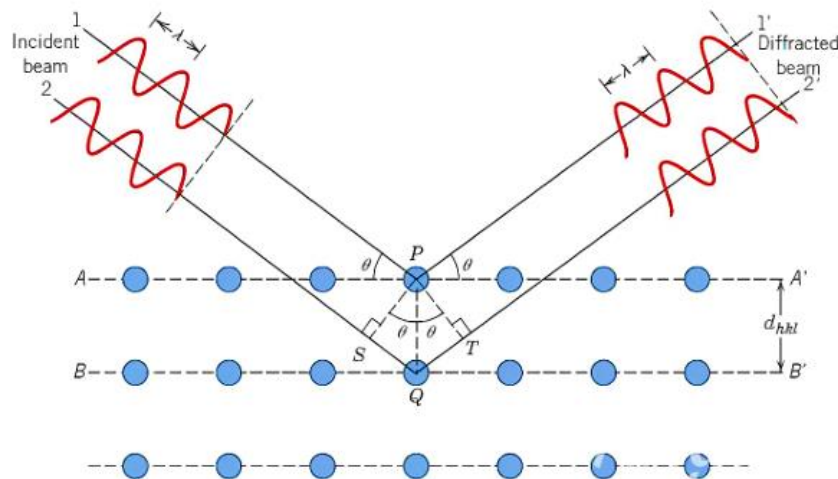
Beberapa contoh aplikasi STA meliputi karakterisasi bahan polimer, keramik, logam, bahan komposit, serta material organik dan anorganik lainnya. Dengan sensitivitas tinggi dan kemampuan observasi simultan, STA menjadi alat yang sangat berharga dalam penelitian ilmiah maupun industri.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh (Osfouri dan Simon, 2022) STA digunakan untuk mempelajari perilaku termal dari *foam glass* yang diproduksi dengan berbagai komposisi partikel kaca dan agen pembusa. Melalui analisis ini, mereka dapat mengidentifikasi temperatur dekomposisi dan stabilitas termal dari material yang dihasilkan.

2.7.2 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) atau Difraksi Sinar-X adalah teknik analisis yang digunakan untuk menentukan struktur kristal dari suatu material. Metode ini didasarkan pada prinsip difraksi sinar-X oleh atom dalam kristal yang menghasilkan pola difraksi yang unik untuk setiap struktur kristal. Karakterisasi XRD sangat penting dalam bidang material, kimia, fisika, dan biologi karena dapat memberikan informasi tentang ukuran kristal, orientasi, serta struktur internal material.

Teknik XRD digunakan untuk menganalisis struktur kristal karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola difraksi yang unik. Ketika sinar-X dengan panjang gelombang tertentu diarahkan ke permukaan kristal pada sudut tertentu, sebagian sinar tersebut akan dihamburkan oleh bidang atom dalam kristal. Sinar-X yang tersebar pada arah tertentu akan menghasilkan puncak difraksi yang bisa diamati dengan perangkat XRD. Jika pola difraksi unsur sudah diketahui, maka unsur tersebut dapat diidentifikasi dari hasil analisis (Munasir dkk., 2012). Ilustrasi dari difraksi sinar-X ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Difraksi sinar-X.

Difraksi sinar-X terjadi ketika sinar-X diarahkan pada suatu kristal yang memiliki struktur atomik yang teratur. Ketika sinar-X mengenai kristal, gelombang sinar-X akan berinteraksi dengan atom-atom di dalam kristal tersebut. Setiap atom dalam kristal dapat dianggap sebagai titik hambur, di mana gelombang sinar-X yang datang akan tersebar ke berbagai arah setelah bertabrakan dengan elektron di dalam atom. Jika kedua sinar sejajar dan memiliki fasa yang saling memperkuat, maka jarak tambahan yang ditempuh oleh sinar kedua, yaitu $SQ + QT$, harus merupakan kelipatan dari panjang gelombang. Kondisi untuk terjadinya interferensi konstruktif (fasa yang saling memperkuat) ini diatur oleh hukum Bragg, yang menyatakan bahwa difraksi yang kuat akan terjadi ketika selisih lintasan antara gelombang sinar-X yang dipantulkan dari lapisan-lapisan atom berturut-turut dalam kristal sama dengan kelipatan dari panjang gelombang sinar-X. Secara matematis, hukum Bragg dinyatakan sebagai Persamaan (2.1)

$$n\lambda = SQ + QT$$

$$n\lambda = d \sin \theta + d \sin \theta$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (2.1)$$

Keterangan:

n = Orde difraksi

λ = Panjang gelombang sinar-X

d = Jarak antar bidang kristal

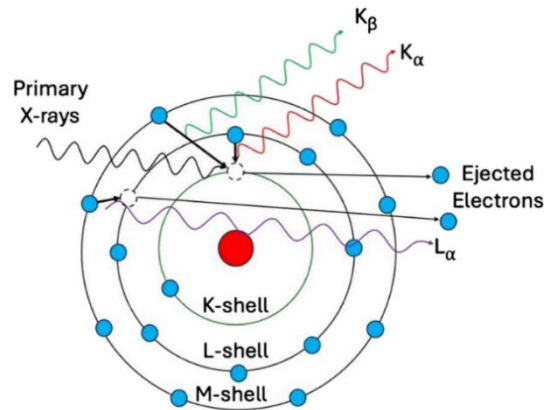
θ = Sudut datang sinar-X

Ketika sinar-X mengenai kristal dengan sudut tertentu (θ), sinar tersebut dipantulkan dari berbagai lapisan atom yang paralel di dalam kristal. Karena susunan atom yang teratur, sinar-X yang dipantulkan ini akan memiliki selisih lintasan yang teratur pula. Jika selisih lintasan ini memenuhi syarat hukum Bragg, maka gelombang-gelombang yang dipantulkan dari lapisan-lapisan tersebut akan saling memperkuat, menghasilkan puncak intensitas pada sudut tertentu. Sudut tersebut dikenal sebagai sudut difraksi (2θ) dan pola difraksi yang terbentuk dapat dianalisis untuk menentukan struktur kristal tersebut (Ameh, 2019).

2.7.3 *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)* digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari berbagai jenis bahan. Teknik ini dapat mengukur konsentrasi unsur-unsur berdasarkan panjang gelombang dan jumlah sinar-X yang dipancarkan kembali setelah material tersebut ditembak dengan sinar-X berenergi tinggi. Bahan yang diuji bisa berupa padatan, cairan, bubuk hasil penyaringan, atau bentuk lainnya.

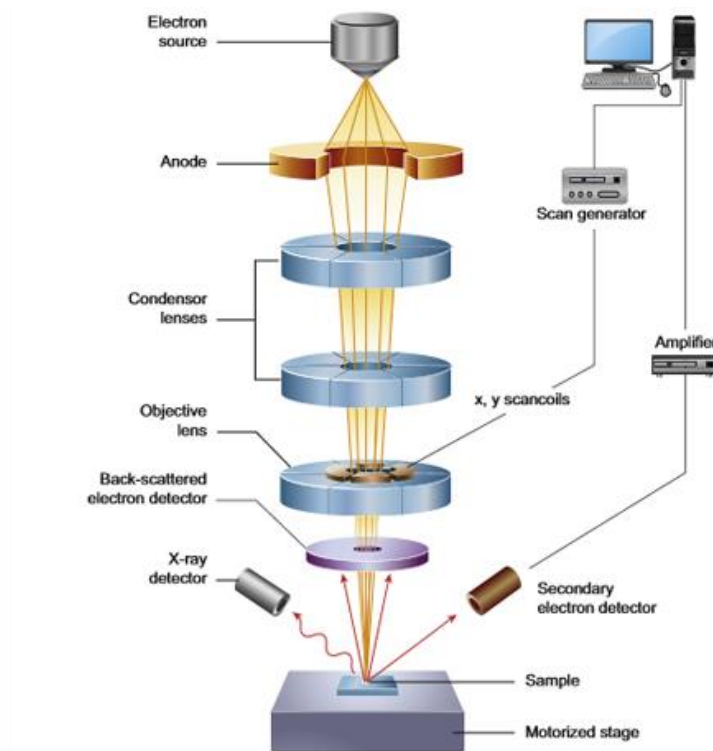
Secara umum, prinsip dari XRF adalah ketika sebuah elektron dari kulit dalam atom terlepas, elektron dari kulit luar akan berpindah untuk mengisi posisi yang ditinggalkan. Perpindahan ini menghasilkan sinar-X dengan panjang gelombang yang spesifik untuk setiap unsur. Pada XRF, orbit yang terlibat biasanya adalah orbit K, L, atau M. Analisis XRF memanfaatkan efek fotolistrik, di mana intensitas sinar-X karakteristik yang dihasilkan dari setiap atom dalam material sebanding dengan jumlah atau konsentrasi atom tersebut di dalam material. Prinsip kerja XRF ditunjukkan oleh Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Prinsip kerja XRF.

2.7.4 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah teknik mikroskopi yang menggunakan berkas elektron untuk memindai permukaan material, menghasilkan gambar resolusi tinggi dari struktur mikro permukaan dan memberikan informasi tentang morfologi, komposisi, dan sifat material. SEM mampu memperbesar hingga 200.000 kali dan dapat mengamati ketebalan dari 200 hingga 0,5 nm. Morfologi permukaan partikel akan terungkap melalui hasil karakterisasi menggunakan SEM (Mursal, 2018). Prinsip kerja SEM ditunjukkan Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Ilustrasi prinsip kerja SEM.

Prinsip kerja SEM melibatkan sumber elektron dari filamen tungsten yang memancarkan berkas elektron. Ketika elektron ini berinteraksi dengan spesimen, mereka menghasilkan elektron sekunder dan sinar-X karakteristik. Dalam interaksi tersebut, sebagian besar berkas elektron keluar kembali sebagai elektron yang disebut *Backscattered Electrons* (BSE), sementara sebagian kecil elektron masuk ke dalam spesimen dan memindahkan energi mereka ke elektron atom, yang kemudian terpental keluar sebagai *Secondary Electrons* (SE). Pembentukan elektron sekunder selalu disertai dengan munculnya sinar-X yang karakteristik untuk setiap elemen. Elektron sekunder yang dihasilkan dari interaksi dengan permukaan spesimen ditangkap oleh detektor *Secondary Electron* (SE), kemudian sinyalnya diolah dan diperkuat oleh *amplifier* sebelum divisualisasikan pada monitor sinar katoda.

2.7.5 Kuat Tekan

Uji kuat tekan adalah salah satu metode pengujian mekanik yang digunakan untuk menentukan kekuatan material terhadap gaya tekan. Pengujian ini penting dalam bidang teknik sipil, material, dan konstruksi, karena hasilnya memberikan

informasi mengenai kemampuan material untuk menahan beban tanpa mengalami keruntuhan (Abdullah, 2021). Uji kuat tekan sering diterapkan pada material seperti beton, batu bata, dan bahan bangunan lainnya menggunakan rumus perhitungan kuat tekan material pada Persamaan (2.2).

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

Keterangan:

P= Kuat tekan material (MPa)

F= Beban Maksimum (N)

A= Luas penampang benda (mm^2)

2.7.6 Densitas

Uji densitas adalah metode pengujian yang digunakan untuk menentukan massa per satuan volume suatu material. Densitas, atau kerapatan, mengukur seberapa padat materi dalam suatu volume tertentu (Jradi dan Seif El Dine, 2023) yang dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.3).

$$\rho = \frac{m_k}{m_b - m_a} \times \rho_{air} \quad (2.3)$$

Keterangan:

ρ = Massa jenis (g/cm^3)

ρ_{air} = Massa jenis air ($1g/cm^3$)

m_k = Massa benda uji kering (g)

m_b = Massa benda uji setelah direndam (g)

m_a = Massa benda uji ditimbang dalam air (g)

2.7.7 Porositas

Uji porositas adalah metode pengujian yang digunakan untuk menentukan volume pori-pori dalam suatu material. Porositas mengukur jumlah ruang kosong dalam material dan dinyatakan sebagai persentase dari total volume. Pengujian ini memiliki aplikasi luas dalam berbagai bidang, termasuk geologi, teknik material,

dan industri perminyakan (Liu dkk., 2023) Adapun nilai porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.4).

$$\Phi = \frac{m_b - m_k}{m_b - m_a} \times 100\% \quad (2.4)$$

Keterangan:

Φ = Porositas (%),

m_k = Massa benda uji kering (g)

m_b = Massa benda uji setelah direndam (g)

m_a = Massa benda uji ditimbang dalam air (g).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan November 2024 sampai dengan Februari 2025 bertempat di Jl. Sutami KM 15 Tanjung Bintang Lampung Selatan; 0721-350055. Tepat di Laboratorium Non Logam, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini: *furnace* 1400°C merk Naberthem tipe LT 15/14 yang berfungsi untuk membakar atau memanaskan material, *ballmill* tipe TR6-Z-A-D112.M4 yang berfungsi untuk menghancurkan bahan yang keras seperti basal, ayakan 325 mesh ASTM:E11 Nakatama Scientific, oven merk Cosmos Tipe CO 9926 RCG (26L), mesin uji kuat tekan merk *Universal Testing Machines* (UTM) made in Thailand tipe HT-2402, timbangan digital merk *Excellent Scale*, mesin *polishing* merk Struers tipe Tegramin-25, SEM tipe: *quatro thermo scientific*, XRD PANalytical tipe: E'xpertPro dan XRF PANalytic tipe: Minipal 4 dan STA 509 *Jupiter* merk NETZSCH.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu: batu basal, silika geotermal, *waterglass*, NaOH, resin, katalis, *polyurethane A (polyol)* dan B (*isocyanate*).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan adalah: preparasi bahan, pembuatan material, pengujian fisis dan karakterisasi material.

3.3.1 Preparasi Bahan

Preparasi bahan meliputi beberapa langkah-langkah sebagai berikut:

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

3.3.2 Pembuatan Material

Preparasi bahan meliputi beberapa langkah-langkah sebagai berikut:

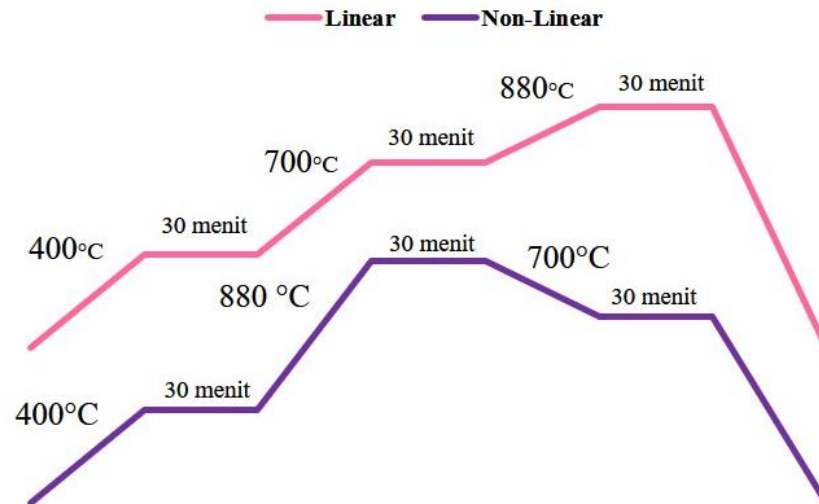
1. Basal dan silika geotermal ditimbang sebanyak 32 g sesuai dengan variasi komposisi dan temperatur pembakaran. Untuk memudahkan penyajian data, material diberi kode dengan format: bahan, perbandingan komposisi dan temperatur, misal CG30/70-L artinya *cellular glass ceramic* mengandung 30% basal dan 70% silika geotermal dengan temperatur pembakaran linear (400°C, 700°C, dan 880°C) yang pada tiap satu tingkatan temperatur ditahan selama 30 menit. Sedangkan CG30/70-NL artinya *cellular glass ceramic* mengandung 30% basal dan 70% silika geotermal dengan temperatur pembakaran non-linear (400°C, 880°C, dan 700°C) yang pada tiap satu tingkatan temperatur ditahan selama 30 menit. Tabel variasi komposisi dan temperatur pembakaran ditunjukkan oleh Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi komposisi dan temperatur pembakaran

No	Kode Material	Komposisi (%wt)		Temperatur (°C)
		Basal	Silika Geotermal	
1.	CG30/70	30	70	-

2.	CG30/70-L	30	70	400, 700, 800
3.	CG30/70-NL	30	70	400, 880, 700
4.	CG50/50	50	50	-
5.	CG50/50-L	50	50	400, 700, 800
6.	CG50/50-NL	50	50	400, 880, 700
7.	CG70/30	70	30	-
8.	CG70/30-L	70	30	400, 700, 800
9.	CG70/30-NL	70	30	400, 880, 700

2. Campuran serbuk basal dan silika geotermal diaduk selama satu menit hingga merata.
3. NaOH 3 M dan *waterglass* ditimbang sebanyak 29,09 g dengan perbandingan 1:2, lalu diaduk selama 3 menit.
4. Padatan (serbuk basal dan silika geotermal) dan cairan (larutan NaOH dan *waterglass*) diaduk hingga homogen selama 3 menit.
5. Poliuretan A dimasukkan ke dalam cetakan terbuat dari mika plastik berbentuk tabung dengan tinggi 12 cm dan diameter 3 cm.
6. Campuran (padatan dan cairan) dimasukkan ke dalam cetakan yang telah berisi poliuretan A dan diaduk hingga homogen.
7. Poliuretan B dimasukkan ke dalam cetakan yang telah berisi campuran (padatan, cairan dan poliuretan A) dan diaduk selama 30 detik hingga campuran mulai berbusa dan mengembang.
8. Material dikeringkan pada temperatur ruang selama 120 jam atau 5 hari, lalu dilepaskan dari cetakan.
9. Material dikeringkan menggunakan oven pada temperatur 80°C selama 4 jam, kemudian dipotong menjadi 3 bagian untuk setiap material.
10. Material dipanaskan menggunakan furnace dengan variasi temperatur seperti yang tercantum dalam Gambar 3.1



Gambar 3. 1 Grafik temperatur *cellular glass ceramic*

3.3.3 Karakterisasi

Material *cellular glass ceramic* dikarakterisasi menggunakan, *Simultaneous Thermal Analysis* (STA) 509 Jupiter merk NETZSCH, XRD *PanAnalytical type expertpro*, XRF *PanAnalytical Type minipal 4* dan SEM *Quatro S*

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

1. *Simultaneous Thermal Analysis* (STA)

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

- a. Material dihaluskan menggunakan mortar.
- b. Material yang telah halus ditimbang sebanyak 2 g.
- c. Material dikarakterisasi dengan STA.

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

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

- a. Material dihaluskan menggunakan mortar.
- b. Material yang telah halus disaring menggunakan *mesh shieve* ukuran 325 mesh.
- c. Material ditimbang sebanyak 2 g.
- d. Material dikarakterisasi menggunakan XRD dan XRF.

3. *Scanning Electron Microscope* (SEM)

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

- a. Semua material di-*mounting* menggunakan bahan resin dan katalis (*hardner*).
- b. Sampel di-*polishing* menggunakan mesin *polishing* dari *grid* 800, 1000, hingga 1200 untuk mendapatkan permukaan *cellular glass ceramic* yang mengkilap.
- c. Semua material dikarakterisasi menggunakan SEM.

3.3.4 Pengujian Material

1. Kuat tekan

Pengujian kuat tekan pada *cellular glass ceramic* dilakukan untuk menentukan besarnya beban tekan maksimum yang dapat ditahan oleh material dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- a. Material *cellular glass ceramic* yang telah diangkat dari air disiapkan dan dikeringkan dalam temperatur ruang selama 24 jam.
- b. Material diletakkan secara simetris pada mesin uji kuat tekan.

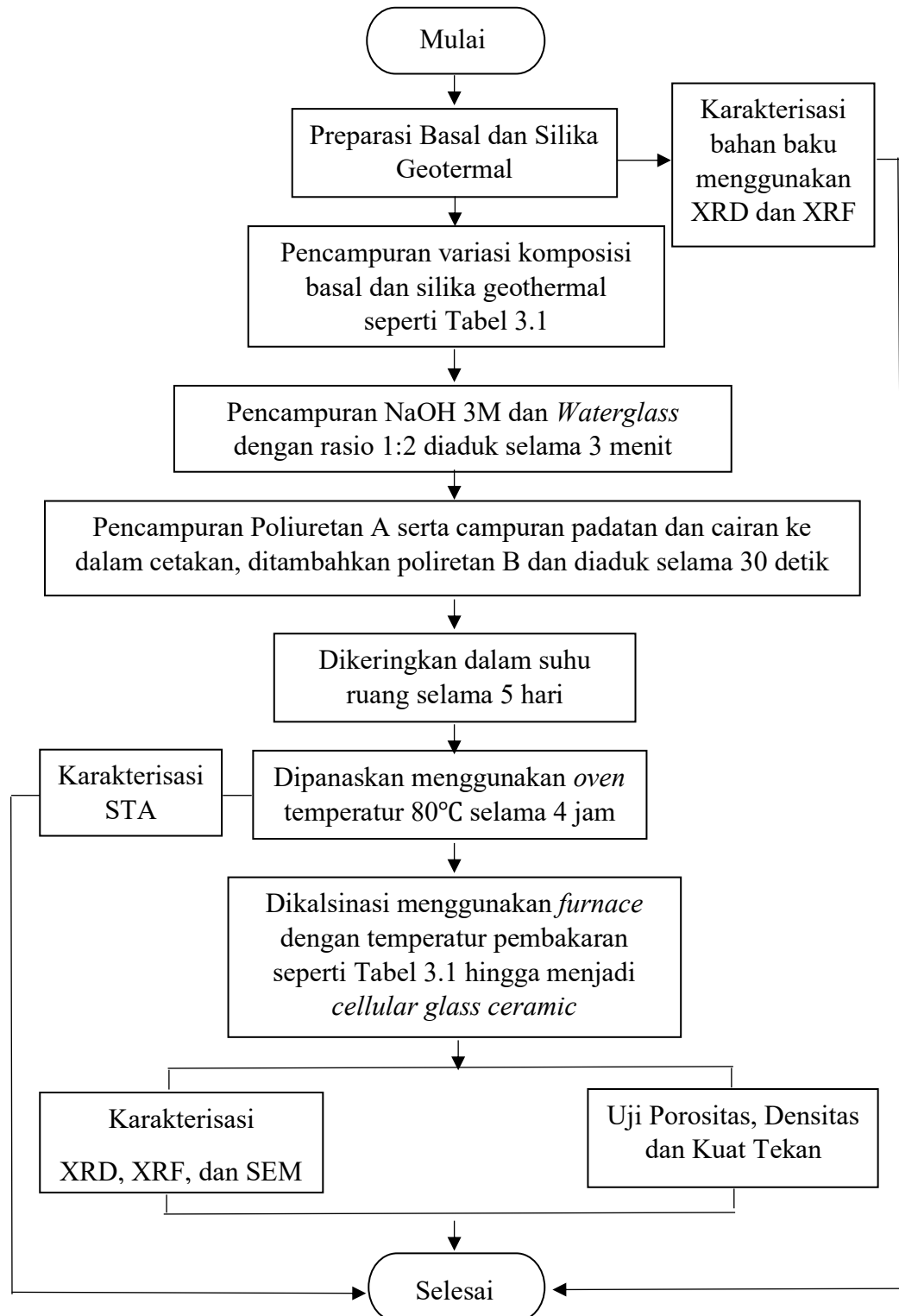
Saat pengujian kuat tekan berlangsung, beban tekan maksimum yang muncul pada saat *dial* tidak lagi naik atau ketika benda uji sudah mengalami kerusakan (P) dicatat.

2. Pengujian densitas dan porositas pada *cellular glass ceramic* dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

- a. Massa material ditimbang dan dicatat dalam kondisi kering menggunakan timbangan digital (w_1).
- b. Material direndam dalam air selama 24 jam.
- c. Permukaan material yang basah diusap dengan kain lap, kemudian ditimbang ulang menggunakan timbangan digital. Hasil massa material setelah perendaman dicatat (w_2).
- d. Material kemudian ditimbang kembali dalam keadaan digantung di dalam air (w_3), dan porositas serta densitas dihitung menggunakan Persamaan (2.3) dan (2.4).

3.4 Diagram Alir

Diagram alir preparasi dan karakterisasi bahan yang digunakan 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 Kesimpulan yaitu:

1. Berdasarkan hasil analisis STA, temperatur optimal untuk pembentukan *cellular glass ceramic* dipilih pada rentang temperatur 400°C hingga 880°C. Rentang temperatur ini dipilih untuk memastikan pembentukan struktur *cellular glass ceramic* yang optimal, dengan kestabilan dan karakteristik material yang diinginkan
2. Berdasarkan hasil XRD, mineral dominan yang terbentuk adalah *albite*, *augite* dan *anorthite*, di mana intensitas puncak tertinggi terjadi pada material CG30/70-L dan CG50/50-L atau dengan perlakuan linear (L). Mineral *albite*, *augite* dan *anorthite* berkontribusi pada peningkatan sifat mekanik material dan stabilitas struktural. Selain itu, hasil XRF menunjukkan bahwa senyawa SiO₂, dengan pada material CG30/70-L dan CG50/50-L memiliki konsentrasi yang paling stabil Kandungan silika yang tinggi ini menunjukkan peran besar silika geothermal dalam membentuk struktur dan sifat *cellular glass ceramic*.
3. Morfologi *cellular glass ceramic* sangat dipengaruhi oleh variasi komposisi dan temperatur pembakaran. Hasil SEM menunjukkan dominasi *close pore* pada CG30/70-L dan CG50/50-L, yang meningkatkan isolasi termal dan kekuatan mekanik.
4. Pada hasil uji kuat tekan, CG30/70-L menunjukkan kekuatan tekan tertinggi, yaitu 35,98 MPa, jauh lebih tinggi dibandingkan CG30/70-NL yang hanya mencapai 5,29 MPa, mencerminkan kemampuan material untuk menahan beban lebih baik. CG30/70-L juga menunjukkan densitas yang lebih tinggi, yang

5. berhubungan langsung dengan kekuatan mekanik yang lebih baik dan kemampuan isolasi termal yang lebih baik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan diperoleh saran yaitu:

1. Untuk menghasilkan produk *cellular glass ceramic* berkualitas tinggi, diperlukan penelitian lebih mendalam terkait pengaruh temperatur yang optimal terhadap proses pembentukan dan karakteristik material. Penelitian lebih lanjut dapat memfokuskan pada variasi temperatur dan pengaruhnya terhadap struktur dan sifat material yang dihasilkan.
2. Penelitian lanjutan diperlukan untuk menentukan variasi komposisi bahan yang tepat dan mempelajari pengaruhnya terhadap sifat fisis, seperti densitas dan porositas, serta sifat mekanik, seperti kekuatan tekan. Hal ini penting untuk memastikan produk *cellular glass ceramic* memiliki karakteristik yang sesuai dengan standar yang diinginkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, A. 2021. Effects of specimen sizes and loading rates on compressive strength of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 46, 1783–1786.
- Akbar, F., Fadli, A., Ismawati, H., dan Sihombing, J. 2016. *Pembuatan Cellular Glass dari Fly Ash Pabrik Kelapa Sawit*. 2(1)42–48.
- Al Muttaqii, M., Kurniajaya, F., dan Hadi, A. E. 2022. Karakteristik Material Komposit Berbasis Batuan Basal dan Dross AL. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 13(1), 21–27. <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2022.013.01.3>
- Ameh, E. S. 2019. A review of basic crystallography and X-Ray diffraction applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(7), 3289–3302. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04508-1>
- Asis, S. 2018. Pengaruh Waktu Pengilingan Menggunakan Ball Mill Terhadap Ukuran Partikel Batuan Basal. *DINTEK*, 11(1), 13–17.
- Bernardo, E. 2007. Micro and macro cellular sintered glass ceramics from wastes. *Journal of the European ceramic Society*, 27(6), 215–222.
- Colombo, P. 2006. Conventional and novel processing methods for cellular ceramics. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 3(8), 109–124. <https://doi.org/10.1098/rsta.2005.1683>
- Cozzarini, L., De Lorenzi, L., Barago, N., Sbaizero, O., dan Bevilacqua, P. 2023. Expanded Glass for Thermal and Acoustic Insulation from Recycled Post-Consumer Glass and Textile Industry Process Waste. *Materials*, 16(4), 1721. <https://doi.org/10.3390/ma16041721>
- Das, A., dan Mahanwar, P. 2020. A brief discussion on advances in polyurethane applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 3(3), 93–101.
- Ergul, S., Ferrante, F., Piscicella, P., Karamanov, A., dan Pelino, M. (2009). Characterization of basaltic tuffs and their applications for the

- production of ceramic and glass–ceramic materials. *Ceramics International*, 35(7), 2789–2795.
- Fernandes, H. R., Tulyaganov, D. U., dan Ferreira, J. M. F. 2009. Production and characterisation of glass ceramic foams from recycled raw materials. *Advances in Applied Ceramics*, 108(1), 9–13. <https://doi.org/10.1179/174367509X344971>
- Francis, A. A., Abdel Rahman, M. K., dan Daoud, A. 2013. Processing, structures and compressive properties of porous glass-ceramic composites prepared from secondary by-product materials. *Ceramics International*, 39(6), 7089–7095.
- Ghozali, M., Saputra, A. H., Triwulandari, E., dan Haryono, A. 2018. Modifikasi epoksi dengan poliuretan tanpa melalui tahap prepolymer poliuretan. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 15(4), 208–213.
- Gultom, F., dan Hernawaty, H. (2019). Pengaruh Penambahan Nanozeolit Alam dalam Preparasi Nanokomposit Foam Poliuretan terhadap Sifat Mekanik. *Jurnal Darma Agung*, 27(3), 1179.
- Gutnikov, S. I., Popov, S. S., Efremov, V. A., Ma, P. C., dan Lazoryak, B. I. 2021. Correlation of phase composition, structure, and mechanical properties of natural basal continuous fibers. *Natural Resources Research*, 30(2), 1105–1119.
- Hassan, A. M., Bunnori, N. M., Ramesh, S., Tan, C. Y., dan Mo, K. H. 2024. Glass-based foam from alkali activation: A review on effect of primary foaming parameters on microstructure and density. *Construction and Building Materials*, 427, 136157.
- Hisham, N. A. N., Zaid, M. H. M., Aziz, S. H. A., dan Muhammad, F. D. 2021. Comparison of Foam Glass-Ceramics with Different Composition Derived from Ark Clamshell (ACS) and Soda Lime Silica (SLS) Glass Bottles Sintered at Various Temperatures. *Materials*, 14(3), 570. <https://doi.org/10.3390/ma14030570>
- Ivanov, K. S. 2019. Optimization of the structure and properties of foam-glass ceramics. *Magazine of Civil Engineering*, 5 (89), 52–60.
- Jang, D.-H., Kim, Y.-W., Song, I.-H., dan Kim, H.-D. 2006. Processing of Cellular Glasses Using Glass Microspheres. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(10), 3262–3265. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2006.01196.x>
- Jayasinghe, S., dan Edirisinghe, M. 2002. A Novel Method of Forming Open Cell Ceramic Foam. *Journal of Porous Materials*, 9, 265–273. <https://doi.org/10.1023/A:1021648812377>

- Jenie, S. N., Ghaisani, A., Ningrum, Y. P., Kristiani, A., Aulia, F., dan Petrus, H. T. M. B. 2018. Preparation of silica nanoparticles from geothermal sludge via sol-gel method. *AIP Conference Proceedings*, 2026(1).
- Jradi, L., dan Seif El Dine, B. 2023. Dynamic properties of cellular glass aggregate as a lightweight material. *Advanced Engineering Materials*, 25(23), 2300427.
- Liang, X., Li, Y., He, Z., Yan, W., Tan, F., Wang, Q., ... dan Sang, S. 2022. The effect of cellular structure on the strength and combustion properties of SiC porous ceramics. *Ceramics International*, 48(2), 2538-2545.
- Leni, R., Yuliana, S., dan Muhamad, A. 2019. Pengaruh temperatur terhadap karakterisasi klinker semen dengan substitusi 20% batu basal terhadap massa batu kapur dan 20% batubara terhadap massa total sebagai reduktor. *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika*, 7(1), 29–34.
- Khater, G. A., Abu, S. M. O., dan Hamzawy, E. 2015. Augite-anorthite glass-ceramics from residues of basal quarry and ceramic wastes. *Processing and Application of Ceramics*, 9(2), 117-123.
- Li, X., Niu, S., Wang, D., Li, J., Jiao, Q., Guo, X., dan Xu, X. 2023. Microstructure and crystallization kinetics of silica-based ceramic cores with enhanced high-temperature property. *Materials*, 16(2), 606.
- Liao, W., Guo, Y., Lu, Y., dan Liu, C. 2024. Crystallization of sodium calcium silicate glass for highly transparent glass-ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 44(5), 3218-3225.
- Liu, C., Xia, Y., Chen, J., Huang, K., Wang, J., Wang, C., Huang, Z., Wang, X., Rao, C., dan Shi, M. 2023. Research and Application Progress of Vegetation Porous Concrete. *Materials*, 16(21), 7039.
- Martín, M. I., Andreola, F., Barbieri, L., Bondioli, F., Lancellotti, I., Rincón, J. M., dan Romero, M. 2013. Crystallisation and microstructure of nepheline–forsterite glass-ceramics. *Ceramics International*, 39(3), 2955-2966.
- Marques, V. M., Tulyaganov, D. U., Kothiyal, G. P., dan Ferreira, J. M. 2010. The effect of TiO₂ and P₂O₅ on densification behavior and properties of Anortite-Diopside glass-ceramic substrates. *Journal of electroceramics*, 25(1), 38-44.
- Munasir, M., Triwikantoro, T., Zainuri, M., dan Darminto, D. 2012. Uji XRD dan XRF Pada Bahan Meneral (Batuan Dan Pasir) Sebagai Sumber Material Cerdas (Caco₃ Dan Sio₂). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, 2(1), 20. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v2n1.p20-29>

- Mursal, I. L. P. 2018. Karakterisasi XRD dan SEM Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore: Jurnal Sains dan Ilmu Farmasi*, 3(2).
- Odewole, P. O. 2021. Evaluating the properties of cellular ceramics prepared with a granite dust and plantain (*Musa paradisiaca*) peel powder for external wall thermal insulation of buildings. *Cerâmica*, 67(384), 414–421. <https://doi.org/10.1590/0366-69132021673843137>
- Osfour, M., dan Simon, A. 2022. Study on the thermal conductivity and density of foam glass. *Pollack Periodica*.
- Padmanabhan, K. A., dan Basariya, M. R. 2019. A theory of steady state structural superplasticity in different classes of materials: A materials-agnostic analysis. *Materials Science and Engineering: A*, 744, 704–715. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.086>
- Paunescu, L., Dragoescu, M. F., Axinte, S. M., dan Cosmulescu, F. 2021. Nonconventional manufacture technique of cellular glass from recycled aluminosilicate glass-based waste. *Material Science dan Engineering International Journal*, 5(1), 11–16.
- Peyrton, J., dan Avérous, L. 2021. Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145, 100608.
- Pokhrel, A., Seo, D. N., Lee, S. T., dan Kim, I. J. 2013. Processing of porous ceramics by direct foaming: A review. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 50(2), 93–102.
- Qing, Z., Zhou, W., Xia, W., dan Li, H. 2018. Crystallization kinetics, sintering, microstructure, and properties of low temperature co-fired magnesium aluminum silicate glass-ceramic. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 486, 14–18.
- Rahayu, F., dan Zainuri, M. 2016. Pengaruh Jenis Fasa SiO₂ (Amorphous, Quartz, Cristobalite) Terhadap Sifat Hydrophobic pada Media Kaca. *Institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Rajiman, R., dan Ningrum, S. 2019. Tinjauan Kuat Tekan Beton Menggunakan Ca Serbuk Batu Basal Sebagai Bahan Pena Ordinary Portland Cemen (Opc). *TAPAK (Teknologi Aplikasi Konstruksi): Jurnal Program Studi Teknik Sipil*, 8(2), 170–178.
- Rincón, A., Marangoni, M., Cetin, S., dan Bernardo, E. 2016. Recycling of inorganic waste in monolithic and cellular glass-based materials for structural and functional applications. *Journal of Chemical Technology dan Biotechnology*, 91(7), 1946–1961. <https://doi.org/10.1002/jctb.4982>

- Riyanto, N., Sumardi, I. P., Perdana, I., dan Yogyakarta, J. G. 2012. Kinetika pelarutan silika amorf dari lumpur panas bumi dieng. *Jurnal Rekayasa Proses*, 6(1), 1–6.
- Rohaeti, E., dan Hikmawati, I. 2010. Production of semiconductor materials silicon from silica rice husk waste as alternative silicon sources. *Materials Science and Technology Conference; Houston, TX, USA*, 265–272.
- Salim, M. F., Diastyari, D. E., dan Widodo, L. U. W. 2019. Pemanfaatan Geothermal Sludge Untuk Pembuatan Bata Ringan. *Jurnal Teknik Kimia*, 13(2), 57–60.
- Sauni, H., Fernando, Z. J., dan Candra, S. 2022. Energi Geothermal dalam Aturan, Masalah Lingkungan Hidup dan Solusi Penyelesaian Konflik di Masyarakat (Geothermal Energy In Rules, Environmental Problems and Community Conflict Solutions). *Jurnal Rechts Vinding: Media Pembinaan Hukum Nasional*, 11(3).
- Sedlačík, M., Nguyen, M., Opravil, T., dan Sokolář, R. 2022. Preparation and Characterization of Glass-Ceramic Foam from Clay-Rich Waste Diatomaceous Earth. *Materials*, 15(4), 1384. <https://doi.org/10.3390/ma15041384>
- Shamsudin, Z., Hodzic, A., Soutis, C., Hand, R. J., Hayes, S. A., dan Bond, I. P. 2011. Characterisation of thermo-mechanical properties of MgO–Al₂O₃–SiO₂ glass ceramic with different heat treatment temperatures. *Journal of materials science*, 46(17), 5822–5829.
- Shekunov, B. 2020. Kinetics of Crystallization and Glass Transition in Amorphous Materials. *Crystal Growth dan Design*, 20(1), 95–106. <https://doi.org/10.1021/acs.cgd.9b00651>
- Silviana, S. 2020. *Geothermal silica waste as sustainable amorphous silica source for the synthesis of silica xerogels*.
- Silviana, S., Janitra, A. A., Sa'adah, A. N., dan Dalanta, F. 2022. Synthesis of aminopropyl-functionalized mesoporous silica derived from geothermal silica for an effective slow-release urea carrier. *Industrial dan Engineering Chemistry Research*, 61(26), 9283–9299.
- Son, S., dan Kim, K. 2023. Effect of TiO₂ content on crystallization behavior of CaO–Al₂O₃–SiO₂–ZnO glass-ceramic glaze. *Ceramics International*, 49(9), 13677–13686.
- Van Humbeeck, J. 1998. *Simultaneous Thermal Analysis* (hlm. 497–508). [https://doi.org/10.1016/S1573-4374\(98\)80014-9](https://doi.org/10.1016/S1573-4374(98)80014-9)

- Wang, X., Liu, H., Wang, L., Liu, B., dan Wang, L. 2018. Optimization of thermal insulation performance for the porous materials. *Heat Transfer Engineering*, 39(17-18), 1573-1581.
- Xu, W., Shen, K., Cao, Z., Liu, F., Zhang, Y., Zhang, T., ... dan Ouyang, S. (2021). Crystallization and thermal stability effects on tailings glass-ceramics by various heat treating processes. *Materials Chemistry and Physics*, 263, 124334.
- Yılmaz, S., Bayrak, G., Sen, S., dan Sen, U. 2006. Structural characterization of basal-based glass–ceramic coatings. *Materials dan Design*, 27(10), 1092-1096.
- Yuliansyah, F., dan Sujatmiko, C. 2019. Analisis Variasi Ukuran Agregat Batu Basal Scoria terhadap Hasil Uji Kuat Tekan Beton Mutu K-250. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 4(2), 1–10.
- Zegowitz, A. 2010. Cellular glass aggregate serving as thermal insulation and a drainage layer. *Buildings conference*, 1–8.