

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN POLIURETAN TERHADAP
PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* BERBASIS *BASALT*
DAN *SLAG BOILER* MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

(Skripsi)

Oleh

**Mela Retnosari
1917041026**



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

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN POLIURETAN TERHADAP PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* BERBASIS *BASALT* DAN *SLAG BOILER* MELALUI METODE *DIRECT FOAMING*

Oleh

Mela Retnosari

Telah dilakukan penelitian sebagai upaya peningkatan nilai tambah limbah padat industri menjadi produk *cellular glass ceramic* berupa batu *basalt* dan *slag boiler*. Penelitian ini menggunakan variasi komposisi *basalt:slag boiler* sebesar 90:10%, 80:20%, 70:30%, 60:40%, dan 50:50%. Kemudian variasi poliuretan yang digunakan sebesar 30%, 40%, dan 50% sebagai *foaming agent* dengan pemanasan sampai suhu 950°C dengan penahanan pada suhu 400°C dan 700°C selama 2 jam dengan pendinginan di dalam tungku. Berdasarkan hasil karakterisasi dan uji mekanis serta fisis pada sampel didapatkan hasil yang cukup baik. Pada sampel didominasi SiO₂, Fe₂O₃, CaO dan Al₂O₃ yang cukup tinggi dengan fase kristal yang cukup banyak terbentuk yakni quartz dan augite, yang memiliki ukuran pori sebesar ukuran ≤ 1 mm sekitar 85% dan > 1 mm sekitar 15%. Nilai kuat tekan densitas, dan porositas terbaik berturut-turut sebesar 8,68 MPa; 1,14 g/cm³; dan 13,55%.

Kata Kunci: *cellular glass ceramic, basalt, slag boiler, foaming agent, poliuretan*

ABSTRACT

THE EFFECT OF COMPOSITION AND POLYURETANE VARIATIONS ON THE FORMATION OF CELLULAR CERAMIC BASED ON BASALT AND SLAG BOILER THROUGH DIRECT FOAMING METHOD

By

Mela Retnosari

Research has been carried out as an effort to increase the added value of industrial solid waste into cellular glass ceramic products in the form of basalt stone and boiler slag. This research uses variations in basalt:slag boiler composition of 90:10%, 80:20%, 70:30%, 60:40%, and 50:50%. Then the polyurethane variations used were 30%, 40%, and 50% as a foaming agent by heating to a temperature of 950°C with holding at a temperature of 400°C and 700°C for 2 hours with cooling in a furnace. Based on the results of characterization and mechanical and physical tests on the samples, quite good results were obtained. The samples are dominated by SiO₂, Fe₂O₃, CaO and Al₂O₃ which are quite high with quite a lot of crystal phases formed, namely quartz and augite, which have pore sizes of ≤1 mm, around 85% and >1 mm, around 15%. The best compressive strength, density and porosity values respectively were 8.68 MPa; 1.14 g/cm³; and 13.55%.

Keywords: *cellular glass ceramic, basalt, boiler slag, foaming agent, polyurethane*

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI DAN POLIURETAN TERHADAP
PEMBENTUKAN *CELLULAR GLASS CERAMIC* BERBASIS *BASALT*
DAN *SLAG BOILER* MELALUI METODE *DIRECT FOAMING***

Oleh

Mela Retnosari

Skripsi

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

Pada

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



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2023**

Judul Skripsi : Pengaruh Variasi Komposisi dan Poliuretan terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbasis *Basalt* dan *Slag Boiler* melalui Metode *Direct Foaming*

Nama Mahasiswa : Mela Retnosari

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041026

Program Studi : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

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

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

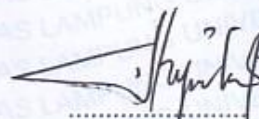
2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

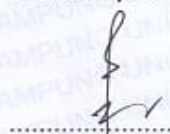
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

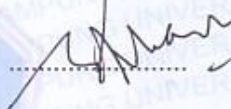
Ketua : Suprihatin, S.Si., M.Si.



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



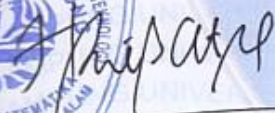
Penguji Bukan Pembimbing : Drs. Pulung Karo Karo, M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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



Tanggal Lulus Ujian Skripsi: 19 September 2023

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang orang lain dan tidak terdapat pendapat atau karya yang ditulis oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan pula bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

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

Bandar Lampung, 19 September 2023



Mela Retnosari

NPM. 1917041026

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Mela Retnosari, dilahirkan pada tanggal 20 Desember 2000 di Pesawaran. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Bambang Ismoyo dan Ibu Sulastriana.

Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis adalah SDN 28 Gedong Tataan pada Tahun 2013, SMP 17. 1 Gedong Tataan pada Tahun 2016, SMAN 1 Gedong Tataan pada Tahun 2019. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur SNMPTN.

Selama menempuh pendidikan, penulis aktif menjadi anggota Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI) pada bidang saintek pada tahun 2019-2020. Kemudian menjadi pengurus Gugus Fakultas Kopma Unila pada tahun 2020 dan staf Badan Eksekutif Mahasiswa Fakultas (BEMF) pada dinas Pemberdayaan Wanita (PW) pada tahun 2021. Penulis juga telah mengikuti program pengabdian masyarakat dengan mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) pada tahun 2022 di Desa Way Lima, Gedong Tataan, Pesawaran. Penulis telah menyelesaikan kegiatan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di PTPN VII Unit Bekri Lampung Tengah pada tahun 2023. Selanjutnya penulis melakukan penelitian bidang non logam sebagai topik skripsi di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung dengan judul

“Pengaruh Variasi Komposisi dan Poliuretan terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbasis *Basalt* dan *Slag Boiler* melalui Metode *Direct Foaming*”. Penulis melakukan penelitian di Laboratorium Non Logam, Pusat Riset dan Teknologi Pertambangan (BRIN), Kabupaten Lampung Selatan, Provinsi Lampung.

MOTTO

مَنْ جَدَّ وَجَدَ

“Barang siapa yang bersungguh-sungguh, ia akan berhasil”

(QS. Al-Baqarah: 286)

La tahzan innallaha ma'ana

“Janganlah engkau bersedih, sesungguhnya Allah bersama kita”

(QS. At-Taubah: 40)

“Hidup yang tidak dipertaruhkan, tidak akan pernah dimenangkan”

Sutan Sjahrir

PERSEMBAHAN

Dengan rasa syukur kepada Allah SWT, kupersembahkan karya kecil ini kepada:

Kedua orang tuaku

Bapak Bambang Ismoyo dan Ibu Sulastriana

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

Keluarga besar & Sahabat Sahabat Terdekat

Rekan-rekan seperjuangan “FISIKA FMIPA UNILA 2019”

Serta Almamater Tercinta

“Universitas Lampung”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Komposisi dan Poliuretan terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbasis *Basalt* dan *Slag Boiler* melalui Metode *Direct Foaming*”** yang merupakan syarat untuk memperoleh 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 jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya agar lebih sempurna dan dapat memperkaya ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 19 September 2023

Mela Retnosari

NPM. 1817041026

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberi kesehatan, hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Komposisi dan Poliuretan terhadap Pembentukan *Cellular Glass Ceramic* Berbasis *Basalt* dan *Slag Boiler* melalui Metode *Direct Foaming*”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., sebagai Pembimbing Pertama yang telah banyak memberi bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya.
2. Bapak David Chandra Birawidha S.T., M.Si., sebagai Pembimbing Kedua yang telah membantu, membimbing, memberi pemahaman dan dukungan terhadap penulis.
3. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si., sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan selama penulisan skripsi.
4. Bapak Dr. Eng. Heri Satria, S.Si., M.Si., sebagai Dekan FMIPA Universitas Lampung.
5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., sebagai Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.

6. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., PhD., sebagai Pembimbing Akademik yang memberikan masukan-masukan serta nasehat selama masa studi di Jurusan Fisika.
7. Kedua orang tuaku Bapak Bambang Ismoyo dan Ibu Sulastriana serta saudara kandungku Rehan Alfi Himawan yang selalu memberikan cinta kasih, dukungan, pengorbanan dan do'a untuk penulis.
8. Sahabat sahabatku Oca, Aryu, Cerly, Kurnia, Ajeng, Febby, Yora, Nisa, Windi, Vivi, Hilya, Vee, Fegi, Linda, Hikmah dan Dhea yang selalu ada disaat senang dan susah serta menjadi kawan diskusi yang baik.
9. Serta teman-teman seperjuangan Fisika 2019.

Bandar Lampung, 19 September 2023

Mela Retnosari

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PERSETUJUAN	iv
LEMBAR PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	ix
PERSEMBAHAN	x
KATA PENGANTAR	xi
SANWACANA	xii
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvi
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Batasan Masalah	5
1.5 Manfaat Penelitian	5
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Cellular Glass Ceramic</i>	6
2.2 Batu <i>Basalt</i>	8
2.3 <i>Slag Boiler</i>	10
2.4 Poliuretan	11
2.5 Alkali Aktivator	12
2.6 Metode <i>direct foaming</i>	14
2.7 Pengujian dan Karakterisasi	15
2.7.1 Kuat Tekan.....	15
2.7.2 Porositas	15
2.7.3 Densitas	16
2.7.4 <i>X-Ray Diffraction (XRD)</i>	17

2.7.5 <i>X-Ray Fluorescence (XRF)</i>	19
2.7.6 <i>Scanning Electron Microscopy (SEM)</i>	20

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	22
3.2 Alat dan Bahan Penelitian	22
3.3 Prosedur Penelitian	23
3.3.1 Preparasi Bahan	23
3.3.2 Pembuatan Sampel.....	23
3.3.3 Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis Sampel.....	24
3.3.4 Karakterisasi	25
3.4 Diagram Alir Penelitian	26

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Karakterisasi Bahan	
4.1.1 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence (XRF) Basalt dan Slag Boiler</i>	29
4.1.2 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction (XRD) Basalt dan Slag Boiler</i>	30
4.2 Hasil Karakterisasi <i>Cellular Glass Ceramic</i>	
4.2.1 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence (XRF) pada Cellular Glass Ceramic</i>	31
4.2.2 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction (XRD) pada Cellular Glass Ceramic</i>	34
4.2.3 Hasil Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy (SEM) pada Cellular Glass Ceramic</i>	37
4.3 Hasil Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis <i>Cellular Glass Ceramic</i>	
4.3.1 Hasil Pengujian Kuat Tekan <i>Cellular Glass Ceramic</i>	44
4.3.2 Hasil Pengujian Densitas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	45
4.3.3 Hasil Pengujian Porositas <i>Cellular Glass Ceramic</i>	46

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	47
5.2 Saran	48

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Struktur <i>cellular glass ceramic</i>	7
Gambar 2.2 Skema difraksi <i>X-Ray</i>	17
Gambar 2.3 Ilustrasi difraksi <i>X-Ray</i> pada XRD	18
Gambar 2.4 Prinsip kerja XRF	20
Gambar 2.5 Prinsip kerja SEM.....	21
Gambar 3.1 Diagram alir preparasi dan karakterisasi bahan baku	26
Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sampel	27
Gambar 3.3 Diagram alir pengujian fisis dan karakterisasi sampel	28
Gambar 4.1 Difraktogram <i>basalt</i> dan <i>slag boiler</i>	30
Gambar 4.2 Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 30%	34
Gambar 4.3 Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 30%	34
Gambar 4.4 Difraktogram <i>cellular glass ceramic</i> PU 30%	35
Gambar 4.5 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 30%) : (a) kode A90:10, (b) kode A70:30, dan (c) kode A50:50	38
Gambar 4.6 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 40%) : (a) kode B80:20 dan (b) kode B70:30	40
Gambar 4.7 Morfologi sampel perbesaran 100x secara SE (PU 50%) : (a) kode A90:10, (b) kode A70:30, dan (c) kode A50:50.....	42
Gambar 4.8 Hubungan variasi komposisi bahan dan PU terhadap massa jenis <i>cellular glass ceramic</i>	45
Gambar 4.9 Hubungan variasi komposisi bahan dan PU terhadap porositas <i>cellular glass ceramic</i>	46

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Senyawa pada <i>basalt</i>	9
Tabel 2.2 Komposisi kimia <i>slag boiler</i> cangkang sawit	11
Tabel 2.3 Kandungan <i>Sodium silicate</i>	13
Tabel 2.4 Kandungan NaOH Molaritas	13
Tabel 3.1 Perbandingan variasi komposisi dan poliuretan sampel.....	23
Tabel 4.1. Hasil karakterisasi XRF <i>basalt</i> dan <i>slag boiler</i>	29
Tabel 4.2. Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass ceramic</i> PU 30%.....	32
Tabel 4.3. Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass ceramic</i> PU 40%.....	32
Tabel 4.4. Hasil karakterisasi XRF <i>cellular glass ceramic</i> PU 50%.....	32
Tabel 4.5. Hasil pengujian kuat tekan <i>cellular glass ceramic</i>	44

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pesatnya perkembangan dunia konstruksi menyebabkan permintaan yang tinggi untuk berbagai jenis material, sehingga mendorong munculnya inovasi-inovasi dalam pembuatan material baru yang lebih berkualitas dengan berbagai keunggulan, salah satunya adalah material ringan. Penggunaan material ringan akan mempengaruhi kualitas konstruksi bangunan yang dihasilkan. Material ringan memiliki keunggulan pada segi kemudahan pelaksanaan, kecepatan pemasangan, serta kerapihan dalam bangunan (Rieshapsari dkk., 2020).

Cellular glass ceramic didefinisikan sebagai material ringan yang terbentuk dari bahan berpori fungsional. Secara khusus, material ini terkenal karena kepadatannya yang rendah, dan kinerja termal yang stabil. Sifat tersebut menjadikannya bahan pilihan untuk aplikasi seperti dalam insulasi panas dan sebagai pembawa katalis suhu tinggi (Zhou dkk., 2018). Sifat ringan *cellular glass ceramic* biasanya berasal dari berat satuan rendah dari bagian padat dan ketersediaan pori-pori yang saling terhubung dalam jumlah yang tinggi. Struktur berpori ini karena adanya gelembung udara dari pencampuran bahan *foaming agent* yang menciptakan massa piropplastik oleh reaksi aditif saat dipanaskan pada suhu 850-1000 °C (Fernandes dkk., 2014).

Selain itu, *cellular glass ceramic* juga memiliki sifat mekanik jauh lebih baik daripada busa polimer (Celani dkk., 2018). Berdasarkan beberapa kelebihan yang dimiliki *cellular glass ceramic*, diperlukan alternatif bahan potensial sebagai pengembangan material ringan. Batu *basalt* dipilih sebagai material mineral non logam yang mudah ditemukan, tidak memerlukan biaya yang besar, dan menggunakan teknologi sederhana (Holand dan George, 2012).

Batu *basalt* berasal dari pembekuan komposisi dasar magma di permukaan atau dekat permukaan bumi, dengan temperatur leleh sekitar 1500-1700 °C. Kandungan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ minimal 70% yang dapat diaplikasikan dalam pembuatan bahan *cellular glass ceramic* (Rajiman dkk., 2018). *Cellular glass ceramic* berbasis *basalt* mengandung unsur-unsur silika yang apabila mengalami proses sintering akan terjadi pelelehan dan memperkecil pori-pori akibat adanya unsur belerang dan gas oksigen sehingga terjadi perubahan struktur mikro seperti jarum-jarum kecil berbentuk *foam* (Amin dan Suharto, 2017).

Penelitian terkait *cellular glass ceramic* yang sedang dikembangkan, diantaranya yaitu penelitian mengenai preparasi *ceramic foams* berbasis *nepheline* dari *basalt tailing* dan *black cotton soil* menggunakan metode pembusaan langsung dengan penambahan NaOH sebanyak 10% wt sebagai *fluxing* dan CaCO_3 sebanyak 0%-0,7% wt sebagai *foaming agent*. Hasilnya menunjukkan bahwa kandungan *basalt tailing* rendah pada penambahan NaOH yang dilarutkan dalam gelas air (Na_2SiO_3) dengan jumlah CaCO_3 yang tepat pada suhu sintering 950° C memperoleh tingkat pori-pori yang dibalur sebagian dengan dinding garis kristal (Sun dkk., 2020).

Pada pembentukan pori sudah banyak peneliti yang mencoba untuk membuat bahan material ringan dengan mencampurkan *foaming agent* sebagai bahan pembuat busa divariasikan dengan bahan lain nya, seperti Mn, O, Carbamide yang dipadukan dengan Fe-Mn-C dan kalsium karbonat (Pratesa dkk., 2019).

Peneliti lainnya yang telah melakukan penelitian mengenai sintesis *cellular glass ceramic* menggunakan *cullet* dan *fly ash* dengan penambahan 1-2 wt% karbonat sebagai *foaming agent* dan suhu sintering 850° C dihasilkan *cellular glass ceramic* yang memiliki struktur mikro yang homogen. Bentuk pori terlihat pada densitas 0,36-0,41 g/cm³ dan kuat tekan pada 2,40-2,80 MPa. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses *foaming* yakni ukuran partikel kaca, *foaming agent*, laju pemanasan, dan laju pendinginan (Brusatin dkk., 2003).

Selaras dengan itu, sudah banyak peneliti yang memanfaatkan limbah sebagai campuran bahan bangunan. Salah satunya yaitu limbah dari pengolahan kelapa sawit berupa *slag boiler* yang dapat dijadikan sebagai bahan agregat yang baik. Kandungan *slag boiler* berupa unsur kimia SiO₂ sebanyak 29,9%, Al₂O₃ sebanyak 1,9% dan CaO 26,9% cocok diaplikasikan sebagai bahan campuran pembentukan *cellular glass ceramic* (Prianti dkk., 2015).

Pada penelitian ini dilakukan pembentukan *cellular glass ceramic* dengan variasi komposisi dan poliuretan berbasis *basalt* dan *slag boiler* melalui metode *direct foaming*. Karakterisasi yang dilakukan yaitu *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui struktur fase yang terbentuk, dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk mengetahui struktur mikro dari permukaan *cellular glass ceramic*. Sedangkan uji fisis pada

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

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap komposisi kimia dan fase yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* dengan karakterisasi XRF dan XRD?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap struktur mikro yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* dengan karakterisasi SEM?
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap sifat mekanis dan fisis (kuat tekan, densitas, dan porositas) pada pembentukan *cellular glass ceramic*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap komposisi kimia dan fase yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* dengan karakterisasi XRF dan XRD.
2. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap struktur mikro yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* dengan karakterisasi SEM.

3. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan poliuretan terhadap sifat mekanis dan fisis (kuat tekan, densitas, dan porositas) pada pembentukan *cellular glass ceramic*.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Batu *basalt* yang digunakan berasal dari Mataram Baru, Lampung Timur.
2. *Slag boiler* yang digunakan berasal dari PTPN VII Unit Bekri Lampung Tengah.
3. Variasi komposisi *basalt* dan *slag boiler* sebesar 90:10%, 80:20%, 70:30%, 60:40%, 50:50%.
4. Variasi Poliuretan sebesar 30%, 40%, 50%.
5. Karakterisasi yang digunakan XRF, XRD dan SEM serta uji mekanis dan fisis meliputi kuat tekan, densitas, dan porositas.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui pengaruh variasi komposisi dan poliuretan berbasis *basalt* dan *slag boiler* dalam pembuatan *cellular glass ceramic*.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi industri bahan bangunan.
3. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Unila dalam bidang Fisika Material.
4. Sebagai tambahan referensi untuk peneliti selanjutnya.

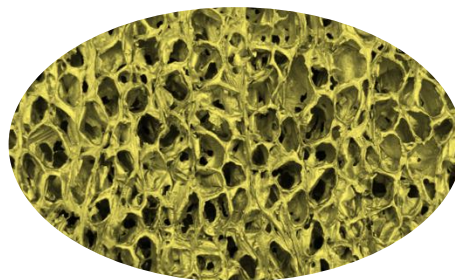
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Cellular Glass Ceramic*

Cellular glass ceramic adalah material isolasi panas berpori dan kedap suara dengan porositas yang dihasilkan hingga 90% (Steiner, 2006). Secara fisik, *cellular glass ceramic* adalah sistem heterofase yang terdiri dari fase gas dan fase padat. Fase padat adalah kaca yang terbentuk dinding tipis sel tunggal setebal beberapa mikrometer. Sel-sel diisi dengan fase gas. Dibandingkan dengan busa polimer, *cellular glass ceramic* memiliki keuntungan yang signifikan yakni stabilitas kimia dan termal yang unggul serta memiliki kekuatan mekanik yang signifikan (Michael, 2014).

Karakteristik *cellular glass ceramic* diantaranya: kuat, tidak mudah terbakar, dan permeabilitas tinggi. *Cellular glass ceramic* dibuat sebagai bahan kaku yang memiliki pori tertutup berfungsi untuk bahan bangunan, sedangkan pori terbuka sebagai insulasi udara dan kinerja penyerapan air yang baik (Lavrentyeva dan Grathwohl, 2007). Sehingga *cellular glass ceramic* diaplikasikan untuk bahan infrastruktur, bahan bangunan, filter dan insulator panas pada bangunan (contohnya: dinding, atap dan lantai) serta insulator peredam suara (Fernandes dkk., 2009).

Prinsip utama dalam pembuatan *cellular glass ceramic* adalah terbentuknya struktur pori tertutup dan dikarakterisasi oleh distribusi ukuran pori baik dalam bentuk atau ukuran pori yang dihasilkan. Dilihat dari struktur selnya, *cellular glass ceramic* terbagi atas 2 jenis yakni sel tertutup (*closed cell*) merupakan struktur jenis *foam* yang mempunyai kuat tekan dan stabilitas dimensi lebih tinggi serta serapan air yang rendah dan sel terbuka (*opened cell*) yang mengandung pori-pori yang saling terkoneksi satu sama lain sehingga jenis *foam* ini mempunyai kerapatan yang cenderung lebih rendah dari sel tertutup (Sunarya, 2013). Struktur *cellular glass ceramic* ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Struktur *cellular glass ceramic* (Sun dkk., 2020).

Bahan yang umumnya digunakan sebagai pembentuk *foam* adalah sodium hidrokarbonat (NaHCO_2) dengan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai bahan pengisinya yang dapat meningkatkan sambung silang yang berpengaruh terhadap densitas dan modulus bahan (Nasruddin dan Aprillena, 2018). Terjadinya pembusaan diakibatkan pelepasan CO , CO_2 atau SO_3 gas yang dihasilkan dari dekomposisi atau oksidasi aditif. Reaksi dekomposisi tersebut umumnya berasal dari keberadaan karbonat atau sulfat, namun jika pada reaksi oksidasi dihubungkan dengan interaksi spesies yang mengandung karbon (C, SiC) dengan oksigen. Penggunaan CaCO_3 ini dinilai lebih terjangkau dari segi harga dan dapat diperoleh

pori yang halus serta struktur *cellular glass ceramic* yang seragam (Marangoni dkk., 2014).

2.2 Batu Basalt

Batu *basalt* adalah batu masif dan keras, tekstur aphanitic, terdiri dari mineral gelas vulkanik, plagioklas, piroksen, amphibole, dan mineral hitam. Batuan ini berasal dari pendinginan cepat lava dengan viskositas rendah yang kaya akan magnesium dan besi. Kandungan mineral vulkanik ini hanya dapat dilihat pada jenis batu *basalt* berukuran butir kuarsa, yang merupakan jenis batu basalt yang disebut Gabro (Settgast dkk., 2019). Gabro adalah batu yang terdiri dari mineral berupa olivin dan piroksen. Sedangkan feldspar terdiri dari feldspar plagioklas Ca. Teksturnya kasar atau phanerite karena memiliki waktu pendinginan yang cukup lama di litosfer. Jika lebih cepat membeku karena mencapai permukaan bumi, maka batuan beku yang terjadi adalah *basalt* dengan tekstur halus. Jadi gabro dan *basalt* sama-sama memiliki komposisi mineral yang sama, namun teksturnya berbeda (Andrade dkk., 2010).

Jumlah cadangan material batu *basalt* di Provinsi Lampung sebesar 318.480.000 ton dan belum tereksplorasi secara optimal. Begitu banyak cadangan hanya digunakan sebagai pondasi untuk pembangunan perumahan. Dengan mengoptimalkan mineral *basalt* maka nilai ekonomisnya akan meningkat, untuk itu perlu dilakukan penelitian mengenai karakteristik mineral *basalt*. Pada penelitian Amin dan Suharto (2017) memiliki kandungan senyawa dari *basalt* seperti pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Senyawa pada *basalt* (Amin dan Suharto, 2017).

Senyawa	Basalt (%wt)
MgO	4,56
Al ₂ O ₃	18,82
SiO ₂	48,418
CaO	9,761
Fe ₂ O ₃	12,595
Na ₂ O	3,356
K ₂ O	0,636
TiO ₂	1,329
MnO	0,194

Ketika *basalt* bereaksi dengan bahan kimia lain tidak menghasilkan reaksi yang berbahaya bagi lingkungan. Oleh karena itu *basalt* cocok untuk aplikasi terutama di bidang keramik. *Basalt* secara kimiawi kaya akan magnesium oksida, kalsium, natrium, kalium, silikon dan besi (Dhand dkk., 2014).

Dengan teknologi pengolahan material yang tepat, *basalt* dapat diaplikasikan menjadi substitusi konsumsi logam di berbagai bidang, seperti konstruksi dengan komposit batangnya untuk substitusi baja, isolasi dan tahan panas dengan mengaplikasikan *basalt* menjadi wol *basalt* dan isolasi cor *basalt* dan masih banyak lagi. Untuk meningkatkan nilai batu *basalt*, biasanya dilakukan dengan melakukan proses perlakuan panas, baik sampai terjadi peleburan atau sekedar pemanasan atau modifikasi proses pendinginan (Dhand dkk., 2015). Proses perlakuan panas dimaksudkan untuk mendapatkan struktur kristal yang baik dengan metode rekristalisasi karena pembentukan kristal merupakan gugus fungsi antara komposisi kimia selama kondisi peleburan dan laju pendinginan sehingga sifat mekanik basalt lebih baik dengan komponen mineral utama labradorite dan anortit (Fan dkk., 2013)

2.3 *Slag Boiler*

Slag boiler ini merupakan agregat buatan yang berasal dari kerak *boiler* berwarna putih keabu-abuan yang mengalami proses penggilingan atau yang telah dihaluskan. Salah satu limbah *boiler* ini pada dasarnya adalah abu yang mengeras pada setiap dinding-dinding *boiler* akibat endapan-endapan abu yang terperangkap pada mesin siklon saat terjadinya pembakaran cangkang dan serat buah kelapa sawit pada tungku pembakaran *boiler*. *Slag/kerak boiler* yang disebabkan adanya endapan-endapan deposit mineral yang mengeras. Fenomena ini sangat merugikan bagi pembakaran pada *boiler*, karena akan mengurangi efisiensi pertukaran panas (Rahman dan Fathurrahman, 2017).

Penyebab fenomena ini adalah tekanan gas yang berbeda pada setiap bahan bakar yang mengakibatkan percikan pijar api dan partikel yang relatif ringan, namun tidak mampu keluar daripada mesin pengendap siklon dan akan melekat pada dinding-dinding *boiler*. Sedangkan partikel yang ringan akan dikeluarkan melalui cerobong asap dan partikel yang relatif berat dan habis terbakar akan tertampung pada tempat abu yang berada dibawah tungku. *Slag/kerak boiler* kelapa sawit ini memiliki massa yang lebih berat daripada *fly ash* (abu terbang) yang keluar daripada cerobong asap, dan kerak *boiler* ini relatif memiliki pori-pori yang banyak (Zahrina, 2007).

Pada umumnya kerak ini digunakan oleh pabrik kelapa sawit sebagai pengeras jalan di sekitar pabrik. Tetapi saat ini telah dimanfaatkan sebagai alternatif bahan agregat yang ramah lingkungan karena kandungan senyawa kimia pada *slag boiler*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Hudan dan Falah (2012), ternyata limbah abu sawit banyak mengandung unsur silika dan alumina yang merupakan bahan

agregat yang baik dalam pembuatan material bangunan seperti ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Komposisi kimia *slag boiler* cangkang sawit (Hudan dan Falah, 2012)

Kandungan	Nilai (%)
SiO ₂	89,9105
CaCO ₃	2,4751
MgCO ₃	0,7301
Fe ₂ O ₃	0,1958
Al ₂ O ₃	0,0012

2.4 Poliuretan

Poliuretan (PU) adalah polimer serbaguna yang terdiri dari campuran fasa padat dan gas yang memiliki gugus fungsi uretan (-NHCOO-) dalam rantai utamanya. Poliuretan berupa campuran antara plastik dan karet yang memiliki sifat mirip dengan karet, namun tingkat kekerasan yang lebih tinggi (He dkk., 2002). Sintesis PUF (*Polyurethane Foam*) melibatkan dua reaksi utama seperti reaksi pembentukan gel dan pembentukan busa. Reaksi pembentuk gel berhubungan dengan pembentukan ikatan yang merupakan hasil isosianat dan gugus hidroksil (Scarfato dkk., 2017).

Pembuatan *foam* poliuretan dengan teknik pre-saturasi pada berbagai tekanan dan temperatur menggunakan gas CO₂ memberikan hasil struktur dan sifat morfologi *foam* yang lebih baik. Ada 2 reaksi yang terjadi dalam pembentukan *foam* poliuretan, reaksi pertama antara isosianat dengan polyol, dan reaksi kedua antara air dengan isosianat yang menghasilkan poliurea dan CO₂ (Rashmi dkk., 2013).

Poliuretan terdapat 2 jenis yaitu: komponen A berupa *polyol* berwarna coklat kehitaman dan komponen B berupa *isocyanate* berwarna kuning. Fungsi bahan ini sebagai pengembang membentuk *open cells* dan bahan perekat *additive* (Heintz dkk., 2005). Poliuretan memiliki beberapa kelebihan seperti elastisitas tinggi, kekuatan mekanik lebih tinggi dari silikon, tahan benturan, dan isolasi tinggi. Telah banyak industri yang menggunakan bahan ini seperti industri busa *fleksible*, pelapis bangunan, insulasi tank dan aplikasi lainnya (Lim dkk., 2008).

2.5 Alkali Aktivator

Reaksi polimerisasi yang terjadi pada material bangunan geopolimer dibantu dengan larutan aktivator berupa *sodium silicate* (Na_2SiO_3) dan *sodium hydroxide* (NaOH). Fungsi *sodium silicate* untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan *sodium hydroxide* berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur Al dan Si yang terkandung dalam bahan campuran (Mustafa dkk., 2012). Pada penelitian ini digunakan 2 jenis larutan aktivator:

1. *Sodium silicate* (Na_2SiO_3)

Sodium silicate biasa dikenal dengan sebutan *waterglass* memiliki warna bening yang terdiri dari dua jenis dalam bentuk padatan dan larutan. Larutan ini memiliki kekentalan yang tinggi, sehingga berpengaruh terhadap *workability* geopolimer yang berfungsi meningkatkan kuat tekan dan perekat material sehingga membentuk pasta yang padat. Berdasarkan penelitian yang dilakukan Olivia (2015), kandungan *Sodium silicate* dapat dilihat seperti pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Kandungan *Sodium silicate* (Olivia, 2015)

Parameter Uji	Satuan	Hasil Analisis
SiO ₂	%	31,75
Na ₂ O	%	14,51
Padatan	%	46,26
Rasio Mol	-	2,26
Densitas	g/cm ³	1,56

2. *Natrium hydroxide* (NaOH)

Natrium hydroxide merupakan sejenis basa logam kaustik yang dapat membentuk suatu larutan alkali yang kuat jika dilarutkan ke dalam air. *Natrium hydroxide* secara alami berbentuk padatan berwarna putih yang mudah larut dalam air dan mampu melepaskan panas ketika dilarutkan, karena reaksi secara eksotermis. Pada penelitian yang dilakukan Hamidi dkk (2016), didapat kandungan NaOH Molaritas seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kandungan NaOH Molaritas (Hamidi dkk., 2016)

Molaritas	Padatan (%)	H₂O(%)
8 M	26,23	-
10 M	31,37	-
12 M	36,09	-
14 M	40,43	63,91
16 M	44,44	59,57

Berdasarkan Tabel 2.4 mengindikasikan bahwa semakin tinggi molaritas pada larutan NaOH maka semakin banyak kandungan padatan di dalamnya.

2.6 Metode *Direct Foaming*

Metode *direct foaming* diawali dengan proses injeksi gelembung gas secara langsung atau dengan penambahan *foam agent* yang menghasilkan reaksi secara kimiawi akibat dekomposisi atau bisa juga dari presipitasi gas yang dilarutkan di dalam fasa cair yang dikontrol oleh temperatur dan tekanan, yang kemudian dikeringkan dan disinter dengan suhu tinggi (Colombo, 2006). Porositas yang dihasilkan bergantung jumlah fasa yang dimasukkan selama proses pembusaan, akan tetapi ukuran pori ditentukan oleh kecepatan pengadukan selama proses pencampuran (Fernandes dkk., 2014).

Bahan pembusa karbonat paling sering dihasilkan dari batu kapur sebagai karbonat termurah. Bahan karbonat lainnya seperti marmer atau bahkan dolomit juga dapat digunakan sebagai bahan pembusa karbonat. Penggunaan berbagai bahan pembusa menyebabkan struktur bahan yang dihasilkan berbeda (Huo dkk., 2017). Proses pembusaan langsung telah digunakan dalam berbagai aplikasi filter atau membran karena kelebihanannya yaitu biaya terjangkau, metode sederhana, porositas yang tinggi, kemampuan menyerap energi mekanik, panas dan getaran yang besar untuk pembuatan keramik berpori (Dragoescu dkk., 2018).

2.7 Pengujian dan Karakterisasi

2.7.1 Kuat Tekan

Kekuatan tekan adalah kemampuan sampel untuk menerima gaya tekan persatuan luas. Semakin tinggi tingkat kekuatan struktur yang dikehendaki, semakin tinggi pula mutu sampel yang dihasilkan (Swardika dkk, 2019). Cara pengujian yang secara umum digunakan adalah standar (ASTM C-305-82, 2001) menggunakan rumus perhitungan kuat tekan sampel pada Persamaan (2.1).

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Keterangan:

P = Kuat tekan sampel (MPa)

F = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang benda uji (mm²)

2.7.2 Porositas

Porositas merupakan persentase pori-pori atau ruang kosong dalam sampel terhadap volume benda (volume total sampel). Porositas berhubungan dengan permeabilitas sampel. Sebuah sampel dianggap mempunyai porositas yang baik jika bagian pori-pori pada batuan saling berhubungan dengan ukuran mikro. Porositas menggambarkan besar kecilnya kekuatan sampel dalam menopang suatu konstruksi. Semakin padat sampel, semakin tinggi tingkat kepadatan maka semakin besar kuat tekan atau mutu sampel (Tumingan dkk, 2016). Menurut ASTM-C 642-06 nilai porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.2).

$$\text{Porositas } (\varphi) = \frac{w_2 - w_1}{w_2 - w_3} \times 100\% \quad (2.2)$$

Keterangan :

w_1 = Massa awal (g)

w_2 = Massa setelah dikeringkan (g)

w_3 = Massa di dalam air (g)

2.7.3 Densitas

Densitas merupakan perbandingan antara massa dengan volume benda. Densitas disebut juga dengan kerapatan (*density*) (Hasanah dkk., 2021). Densitas mengilustrasikan kerapatan ikatan material-material penyusunan batuan. Semakin tinggi massa jenis, maka semakin besar pula massa setiap volumenya (Ridha dan Darminto, 2016). Menurut ASTM-C 642-06 nilai densitas dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.3).

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

Keterangan :

ρ = Densitas (g/cm³)

w_1 = Massa setelah dikeringkan (g)

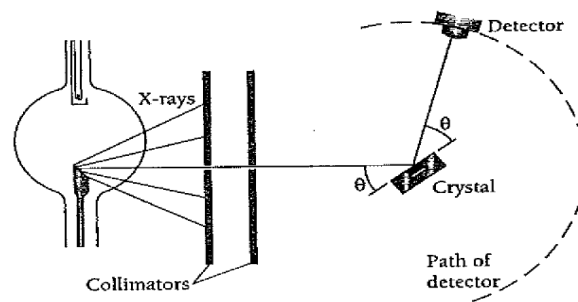
w_2 = Massa di dalam air (g)

ρ_{air} = Massa jenis air (g/cm³)

2.7.4 X-Ray Diffraction (XRD)

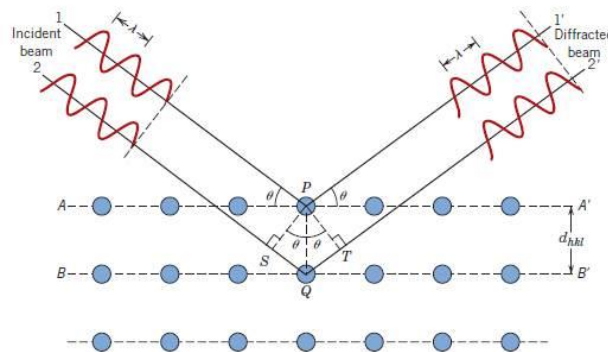
X-Ray Diffraction (XRD) adalah alat karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui senyawa kristal yang terbentuk, meliputi transformasi struktur fase, ukuran partikel bahan seperti keramik, komposit, polimer dan lain-lain. Secara umum, pola difraksi mengandung informasi tentang simetri susunan atom (*space group*), penentuan struktur bahan kristal atau amorph, orientasi kristal serta pengukuran berbagai sifat bahan yaitu tegangan (*strain*), vibrasi termal dan cacat kristal (Cullity, 1978).

Teknik XRD dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristal karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola tertentu. Jika *X-ray* dengan panjang gelombang λ diarahkan ke permukaan kristal dengan sudut datang θ , sehingga beberapa sinar dihamburkan oleh bidang atom dalam kristal. Berkas *X-ray* yang tersebar pada arah tertentu akan menghasilkan puncak difraksi dan dapat diamati dengan perangkat XRD. Apabila dalam analisis ini pola difraksi unsur diketahui, maka unsur tersebut dapat ditentukan (Munasir dkk., 2012).



Gambar 2.2 Skema Difraksi *X-ray*

Gambar 2.2 menunjukkan skema *X-ray* yang menembak sampel padatan kristalin, kemudian mendifraksikan *X-ray* ke segala arah berdasarkan Hukum Bragg. Sinar yang sefase akan saling menguatkan dan yang tidak sefase akan saling meniadakan atau melemahkan. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan untuk mendeteksi berkas *X-ray* yang didifraksikan oleh sinar sefase tersebut akan menghasilkan puncak difraksi. Besar sudut difraksi tergantung pada panjang gelombang (λ) berkas *X-ray* dan jarak antar bidang penghamburan (d). Skema hukum Bragg dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Ilustrasi difraksi *X-Ray* pada XRD

Gambar 2.3 menggambarkan sinar datang yang menumbuk pada titik pada bidang pertama dan dihamburkan oleh atom P. Sinar datang yang kedua menumbuk bidang berikutnya dan dihamburkan oleh atom Q, sinar ini menempuh jarak $SQ + QT$ bila dua sinar tersebut paralel dan satu fasa (saling menguatkan). Jarak tempuh ini merupakan kelipatan (n) panjang gelombang (λ), sehingga persamaan menjadi:

$$n \lambda = SQ + QT \quad (2.4)$$

$$n \lambda = d_{hkl} \sin \theta + d_{hkl} \sin \theta \quad (2.5)$$

$$= 2 d_{hkl} \sin \theta \quad (2.6)$$

Keterangan :

λ = Panjang gelombang sinar *X-ray* (1 Cu = 1,540562Å)

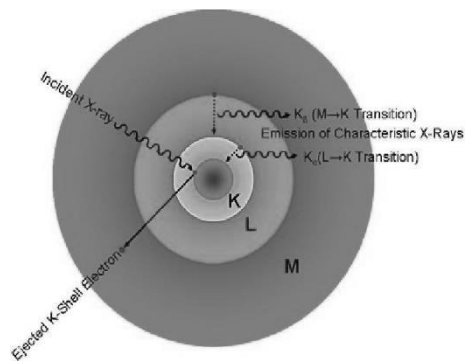
θ = Sudut difraksi yang menggambarkan posisi puncak

d_{hkl} = jarak antar bidang yang menggambarkan sistem, ukuran sel satuan dan indeks Miller bidang tersebut.

Persamaan (2.6) disebut dengan Hukum Bragg. Hukum Bragg merupakan pemantulan yang terjadi jika $\lambda \leq 2d$, sehingga tidak dapat menggunakan cahaya kasat mata (Callister, 2013).

2.7.5 *X-Ray Fluorescence (XRF)*

Karakterisasi menggunakan XRF digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari semua jenis bahan. Teknik ini dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur berdasarkan pada panjang gelombang dan jumlah *X-ray* yang dipancarkan kembali setelah suatu material ditembaki *X-ray* berenergi tinggi. Bahan uji berupa padat, cair, bubuk hasil penyaringan atau bentuk lainnya. XRF terkadang juga bisa digunakan untuk menentukan ketebalan dan komposisi lapisan dan pelapis (Brouwer, 2010). Dalam XRF, sumber *X-ray* meradiasi sampel sehingga unsur-unsur yang muncul pada sampel akan memancarkan radiasi *X-ray* neon dan energi diskrit, seperti warna untuk cahaya optik (Brouwer, 2010) Prinsip kerja XRF ditampilkan pada Gambar 2.4.



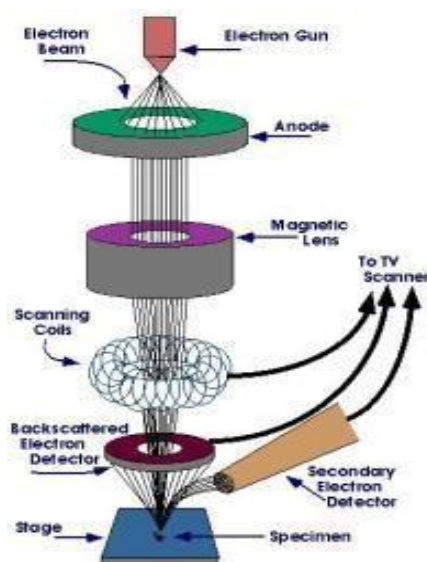
Gambar 2.4 Prinsip kerja XRF (Atmodjo dkk., 2013)

Berdasarkan Gambar 2.4 Pada umumnya prinsip dari XRF ini apabila elektron dari suatu kulit atom bagian dalam dilepaskan maka elektron yang terdapat pada bagian kulit terluar akan berpindah pada kulit yang ditinggalkan tadi menghasilkan *X-ray* dengan panjang gelombang yang dikarakteristik bagi unsur tersebut, orbit pada XRF ini ada orbit K, L, atau M. Analisis XRF juga terjadi karena adanya peristiwa efek fotolistrik, dan untuk setiap atom di dalam sampel intensitas dari *X-ray* karakteristik tersebut sebanding dengan jumlah (konsentrasi) atom yang ada di sampel (Atmodjo dkk., 2013).

2.7.6 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik karakterisasi material yang banyak digunakan untuk mengamati struktur mikro permukaan dan ukuran butir nanomaterial. Batas butir distribusi batas fasa, tanda-tanda deformasi mekanis, dan komposisi kimia semuanya diamati dengan mikroskop elektron pemindaian (SEM), dengan perbesaran 200.000 kali, dan ketebalan yang dapat diamati 200 hingga 0,5 nm. Morfologi permukaan partikel akan terungkap dari hasil karakterisasi partikel menggunakan SEM (Mursal, 2018).

Prinsip kerja SEM adalah sumber elektron dari filamen yang terbuat dari tungsten memancarkan berkas elektron. Jika elektron tersebut berinteraksi dengan bahan (*specimen*) maka akan menghasilkan elektron sekunder dan *X-ray* karakteristik. Akibat interaksi tersebut sebagian besar berkas elektron berhasil keluar kembali, elektron-elektron tersebut disebut sebagai *Backscattered Electrons* (BSE), sebagian kecil elektron masuk ke dalam bahan kemudian memindahkan sebagian besar energi pada elektron atom sehingga terpelanting ke luar permukaan bahan, yaitu *Secondary Electrons* (SE). Pembentukan elektron-elektron sekunder selalu diikuti proses munculnya *X-ray* yang karakteristik untuk setiap filamen. Elektron sekunder hasil elektron dengan permukaan spesimen ditangkap oleh detektor *Secondary Electron* (SE) yang kemudian diolah dan diperkuat oleh amplifier dan kemudian divisualisasikan dalam monitor sinar katoda (Sujatno dkk, 2015). Prinsip kerja pada *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Prinsip kerja SEM (Sujatno dkk., 2015)

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Mei sampai dengan Juli 2023 di Laboratorium Non Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan (BRIN) bertempat di Jl. Sutami KM 15 Tanjung Bintang Lampung Selatan, Lampung.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari *furnace* merk *mini box muffle* yang berfungsi untuk membakar atau memanaskan sampel, *ballmill* tipe TR6-Z-A-D112.M4 yang berfungsi untuk menghancurkan bahan yang keras seperti *basalt* dan *slag boiler*, mortar, alu, ayakan 400 mesh ASTM:E11 Nakatama Scientific, oven, mesin uji kuat tekan merk *Universal Testing Machines* (UTM) made in Thailand tipe HT-2402, timbangan digital merk *Gold series ohaus*, mesin *polishing* merk Struers tipe Tegramin-25, SEM tipe: quatro thermo scientific, XRD PANalytical tipe: E'xpertPro dan XRF PANalytic tipe: Minipal 4.

Sedangkan bahan-bahan yang digunakan pada proses penelitian ini yaitu: batu *basalt*, *slag boiler*, *waterglass*, NaOH, resin, katalis, *polyurethane* A (polyol) dan B (isocyanate).

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan adalah preparasi bahan, pembuatan sampel, pengujian mekanis dan fisis dan karakterisasi sampel.

3.3.1 Preparasi Bahan

Langkah-langkah preparasi bahan sebagai berikut:

1. Batu *basalt scoria* asal Mataram Baru, Lampung Timur dan *slag boiler* yang berasal dari PTPN VII Unit Bekri, Lampung Tengah dihancurkan dengan *ballmill* selama 3 jam.
2. Batu *basalt* dan *slag boiler* disaring dengan ayakan 400 mesh
3. Serbuk *basalt* dan *slag boiler* 400 mesh ditimbang masing-masing 1 g untuk dilakukan karakterisasi awal menggunakan XRD dan XRF yang terdapat di Lab Analisa Pusat Riset Teknologi Pertambangan (BRIN) Lampung.

3.3.2 Pembuatan Sampel

Langkah-langkah pembuatan sampel sebagai berikut :

1. Serbuk *basalt* dan *slag boiler* ditimbang 40 g sesuai dengan variasi komposisi dan poliuretan seperti pada Tabel 3.1.
2. Kode penyajian data sampel dengan format 90:10 untuk komposisi *basalt* dan *slag boiler* sedangkan A, B, dan C untuk presentase PU yang digunakan.

Tabel 3.1 Perbandingan variasi komposisi bahan dan poliuretan sampel

	Variasi	Komposisi				
		(90:10%)	(80:20%)	(70:30%)	(60:40%)	(50:50%)
Poliuretan	30%	A90:10	A80:20	A70:30	A60:40	A50:50
	40%	B90:10	B80:20	B70:30	B60:40	B50:50
	50%	C90:10	C80:20	C70:30	C60:60	C50:50

3. Campuran serbuk *basalt* dan *slag boiler* yang sudah divariasikan diaduk ± 3 menit.
4. NaOH 3 M dan *waterglass* ditimbang 32 g dengan perbandingan 1:2 lalu diaduk ± 3 menit.
5. Padatan dan cairan diaduk hingga homogen selama ± 3 menit.
6. Poliuretan A dan B ditambahkan dengan perbandingan 1:1 sesuai variasi poliuretan dari berat total 72 g seperti pada Tabel 3.1.
7. Campuran bahan diaduk merata dengan cepat ± 1 menit dan dimasukkan dalam cetakan berbentuk tabung dengan ukuran tinggi 16 cm dan diameter 4 cm.
8. Sampel didiamkan dalam suhu ruang selama 24 jam kemudian dilepaskan dari cetakan.
9. Sampel dioven pada suhu 60°C selama 24 jam lalu tiap sampel dipotong menjadi 3 bagian,
10. Sampel dipanaskan dalam *furnace* sampai suhu 950°C dengan penahanan pada suhu 400°C dan 700°C selama 2 jam dengan pendinginan di dalam tungku.

3.3.3 Pengujian Sifat Mekanis dan Fisis Sampel

Tahap pelaksanaan pengujian sampel dilakukan berdasarkan SNI 15-2094-2000.

1) Kuat tekan

Prosedur pengujian kuat tekan pada *cellular glass ceramic* sebagai berikut:

- a. Sampel *cellular glass ceramic* yang telah diangkat dari air dan telah didiamkan selama 24 jam disiapkan.
- b. Sampel diletakkan simetris dengan mesin uji kuat tekan.

- c. Sampel dilihat pada saat uji kuat tekan, kemudian dicatat beban tekan maksimum yang dihasilkan oleh benda uji ketika *dial* tidak naik lagi atau saat benda uji sudah hancur (P).
- d. Kuat tekan dihitung dengan Persamaan (2.1).

2) Pengujian densitas dan porositas

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

- a. Massa sampel ditimbang dan dicatat dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital (w_1).
- b. Sampel direndam dalam air selama 24 jam, tujuannya agar permukaan benar-benar basah.
- c. Sisi permukaan sampel yang berisi air diusap dari masing-masing komposisi menggunakan kain lap, kemudian ditimbang menggunakan timbangan digital dan dicatat massa sampel setelah direndam dalam air (w_2).
- d. Sampel ditimbang kembali dalam keadaan digantung dalam air (w_3). dan dihitung densitas dan porositas dengan Persamaan (2.2) dan (2.3).

3.3.4 Karakterisasi

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

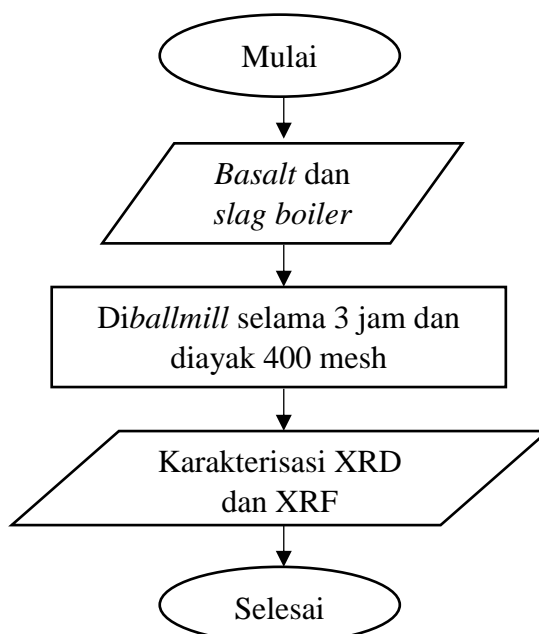
Langkah-langkah karakterisasi pada *cellular glass ceramic* sebagai berikut :

1. Setiap satu bagian sampel di *mounting* menggunakan bahan resin dan katalis.

2. Setelah *mounting* sampel di *polishing* menggunakan mesin *polish* dari *grid* 600, 800, 1000 hingga 1200 untuk memperoleh permukaan *cellular glass ceramic* yang mengkilap.
3. Semua sampel dikarakterisasi menggunakan SEM.
4. Sisa 1 bagian sampel dihaluskan menggunakan mortar.
5. Setiap sampel yang telah halus disaring menggunakan ayakan ukuran 400 mesh.
6. Setiap sampel ditimbang sebanyak 2 g.
7. Semua sampel dikarakterisasi menggunakan XRD dan XRF.

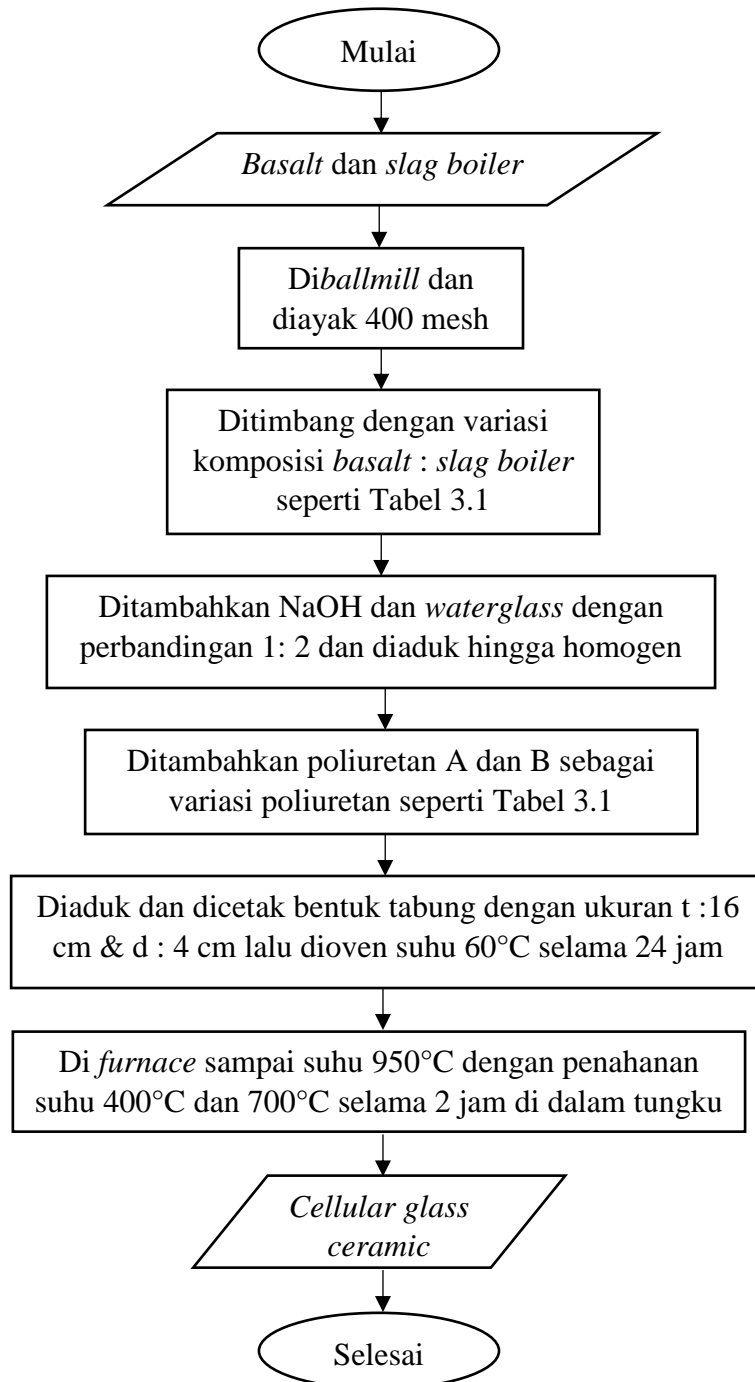
3.4 Diagram Alir

Diagram alir preparasi dan karakterisasi bahan baku yang dilakukan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.1.



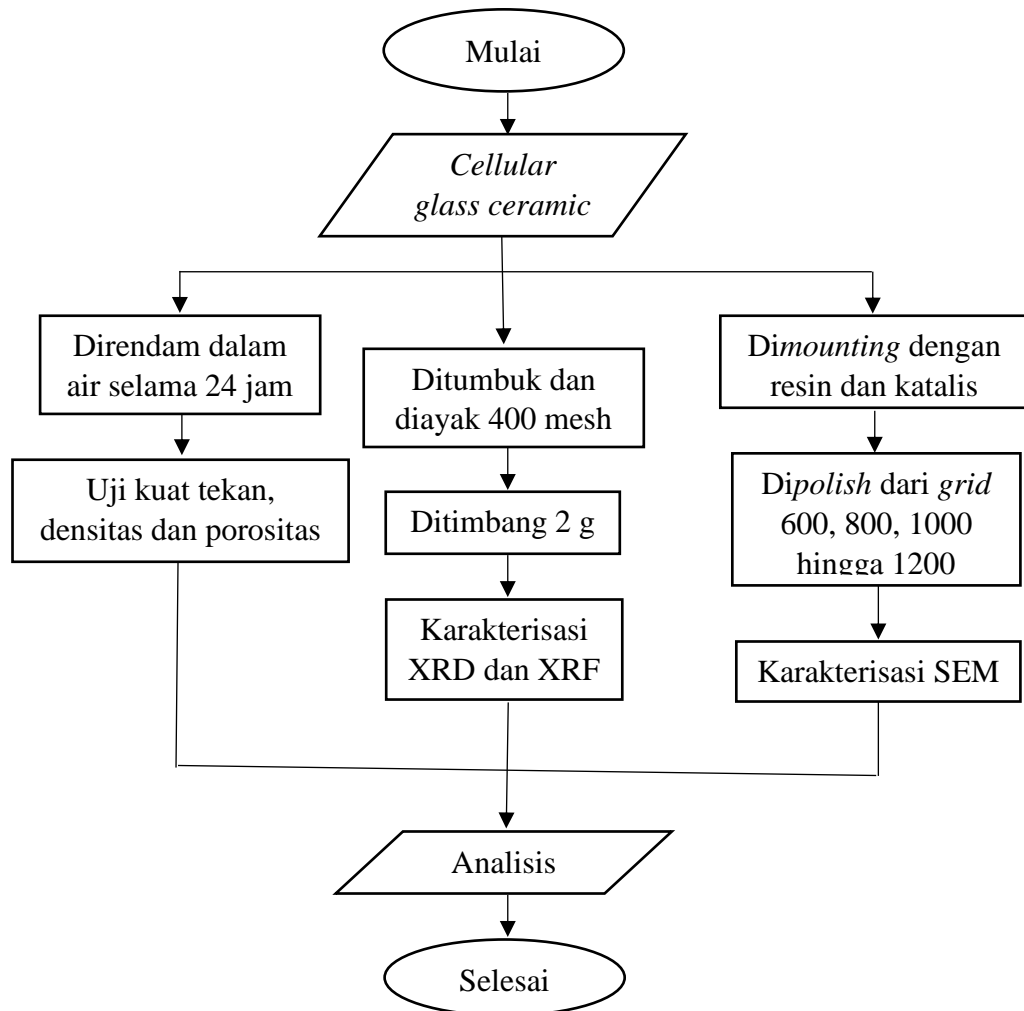
Gambar 3.1. Diagram alir preparasi dan karakterisasi bahan baku

Diagram alir pembuatan sampel *cellular glass ceramic* dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Diagram alir pembuatan sampel

Diagram alir pengujian fisis dan karakterisasi sampel *cellular glass ceramic* dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3.3 Diagram alir pengujian fisis dan karakterisasi sampel

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Berdasarkan hasil karakterisasi XRF komposisi kimia yang dominan dari *cellular glass ceramic* adalah SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 dan CaO .
2. Berdasarkan hasil karakterisasi XRD fase tertinggi yang terbentuk pada *cellular glass ceramic* adalah *quartz*, *olivine*, dan *augite*.
3. Berdasarkan hasil karakterisasi SEM pada *cellular glass ceramic* dengan sampel C50:50 menunjukkan bahwa pori tertinggi sebesar ukuran ≤ 1 mm sekitar 85% dan > 1 mm sekitar 15%.
4. *Cellular glass ceramic* dengan sampel A90:10 memiliki nilai kuat tekan tertinggi sebesar 8,68 MPa dan nilai kuat tekan terendah pada sampel C50:50 sebesar 0,58 MPa, kemudian dengan sampel A90:10 memiliki nilai densitas tertinggi sebesar 1,14 g/cm^3 dan nilai densitas terendah pada sampel C50:50 sebesar 1 g/cm^3 . Sedangkan dengan sampel C50:50 memiliki nilai porositas tertinggi sebesar 13,55% dan nilai porositas terendah pada sampel A90:10 sebesar 5,57%.

5.2 Saran

1. Untuk memperoleh produk *cellular glass ceramic* dengan kualitas yang baik perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai komposisi bahan dan pengaruh suhu yang tepat.
2. Kualitas *cellular glass ceramic* perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai komposisi PU lebih lanjut sebagai penentu sifat fisis dan mekanik (kuat tekan, densitas dan porositas) yang lebih sesuai.

DAFTAR PUSTAKA

- Agathopoulos, S., Fernandes, H. R., Ferreira, J. M. F. & Tulyaganov, D. U. 2006. Preparation and Characterization of High Compressive Strength Foams From Sheet Glass. *Jurnal Porous Material*. No 13. Hal 133-135.
- Amin, M. dan Suharto. 2017. Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basal Guna Menuju Lampung Sejahtera. *BPTM-LIPI Tanjung Bintang*. Lampung Selatan.
- Amin, M., Isnugroho, K., & Hendronursito, Y. 2018. Utilization of blast furnace solid waste (Slag) as cement substitution material on mortar manufacture. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*, Vol 9. No 1. Hal 22-28.
- Andrade FRD, M. Pecchio, DP Bendoraitis, TJ Montanheiro⁴, dan Y. Kihara. 2010. *Tambang Basalt Tailing Sebagai Bahan Baku Klinker Portland*. *Keramik*. Hal 39-43.
- Atmodjo, D. P., Suryana, D., dan Wibowo, H. 2013. Pengujian Unjuk Kerja Sample Holder XRF Epsilon 5. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*, Bandung.
- ASTM C-305-82. 2001. Portland and Blended Cements for Mortar Testing. *Standards Australia*. Queensland: Australia.
- Bai, J., Yang, X., Xu, S., Jing, W., & Yang, J. 2014. *Preparation of foam glass from waste glass and fly ash*. *Materials Letters*. No 136. Hal 52-54.
- Baino, F., & Ferraris, M. 2019. Production and characterization of ceramic foams derived from vitrified bottom ashes. *Materials Letters*. No 236. Hal 281-284.
- Brouwer, P. 2010. *Theory of XRF: Getting Acquainted With The Principles 3rd Edition*. Netherland: Panalytical B.V.
- Brusatin, G., Enrico, B., Scarinci, G. 2003. *Foams Glass*, *Journal Kuhn and Weyln Satz Und Madlen*. No 27. Hal 158-176.
- Callister, D. W. 2013. *Materials Science and Engineering: An Introduction, 9th Edition*. Wiley Global Education: New York.

- Celani, S. Blackburn, MJH Simmons, EH Stitt. 2018. Pengaruh Kondisi Pencampuran Pada Persiapan Busa Basah Keramik. *Chem. Ind. Res Des*: 134, 1-14.
- Chen JJ, Zhu CF, Deng HT, Qin ZN, & Bai YQ. 2009. Preparation and characterization of the waterborne polyurethane modified with nanosilica, *J Polym Res* 16: 375–380.
- Colombo, P. 2006. Metode Pemrosesan Konvensional dan Baru untuk Keramik cellular, *Phil. Trans. R. Soc. A*. No 364. Hal 109-24.
- Cullity, B.D. 1978. *Element of X-Ray Diffraction. Departement of Metallurgical Engeenering and Materials Science*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc: USA. Hal 277-281.
- Csoke, B., Hoffman L., Kertesz M., dan Musci G. 2013. *Physical Characteristics and Technology of Glass Foam from Waste Cathode Ray Tube Glass*. Material Science.
- Darmawati M.Y., O. Bretcanu, and A.R. Boccaccini. 2008. Polymer-bioceramic composite for tissue engineering scaffold. *Journal Material Sciences*. 43: 4433-4442.
- Demenev, Artem D. Vadim T. Khmurchik, Nikolay G. Maksimovich, Elizaveta P. Demeneva dan Alexey M. Sedinin. 2021. *Improvement of Sand Properties Using Biotechnological Precipitation of Calcite Cement (CaCO₃)*. *Environ Earth Sci* 80, 580.
- Dhand, V., Garima Mittal, Kyong YR, dan David H. 2014. *Tinjauan Singkat tentang Basalt Fiber Reinforced Komposit Polimer*. Naskah yang Diterima. Hal 1-63.
- Dhand V., Mittal Garima, You Rhee Kyong, Park Soo-Jin, dan Hui David. 2015. Ulasan Singkat Tentang Komposit Polimer yang Diperkuat Serat Basalt. *Kompos Bagian B*; 73:166-80.
- Dragoescu MF, Paunescu L., Axinte SM. 2018. Metode Pemanasan Nonkonvensional Digunakan Untuk Mendapatkan Busa Kaca dari Limbah Kaca Datar Bening, *Nonconv. teknologi. Wahyu*. Vol 22. No 2. Hal 36-40.
- Fan T, Tong Q, Ye W, Tang J, Chen H, dan Zhang Y. 2013. Morfologi Komposit dan Karakteristik Kristalisasi Leleh Mineral Serat Basalt. *J Cent South Univ (Teknologi Sains)*. Vol 44. No 10. Hal 7-11.
- Fernandes, R. H., Ferreira, D. D., Ferreira, F. M. J., Andreola, F., Lancelloti, I. dan Barbieri, L. 2014. *Environmental Friendly Management of CRT Glass By Foaming With Waste Egg Shells, Calcite or Dolomite Ceramics Internasional*, 40: 13371-13379.
- Fernandes, R. H., Tulyaganov, U. D, dan Ferreira, F. M. J. 2009. “*Production and Characterisation of Glass Ceramic Foams From Recycled Raw materials*” *Ceramics*. No 108. Hal 9-13.

- Guo, Y., Zhang, Y., Huang, H., Meng, K., Hu, K., Hu, P., & Meng, X. 2014. Novel glass ceramic foams materials based on red mud. *Ceramics International*. Vol 40. No 5. Hal 6677-6683.
- Hamidi, R. M., Man, Z., dan Azizli, K. A. 2016. *Concentration of NaOH and Effect on the Properties of Fly Ash Based Geopolymer*. *Procedia Engineering*. Hal 189-193.
- Hasanah, M. S., Yushardi, Y., dan Lesmono, A. D. 2021. Uji Kuat Tekan Daya Serap Air Dan Massa Jenis Batu Bata Merah Berbahan Tambahan Abu Kulit Dan Janggal Jagung Di Wuluhan Jember. *Jurnal Pembelajaran Fisika*. Vol 10. No2. Hal 41.
- Heintz, A.M., D.J. Duffy, C.M. Nelson, Y.Hua, S.L.Hsu. 2005. *Spektroskopi Analisis Perubahan Fase Busa Poliuretan*. *Makromolekul*. No 38. Hal 9192–9199.
- He, Z.A., W.Blank, dan M.Picci. 2002. Katalis Pemisah Dua Komponen Pelapis Poliuretan Dengan Metode Hidro. *J. Mantel. Technol*. No 74. Hal 31-36.
- Holand, W., dan George, H., B. 2012. *Glass-Ceramic Technology*. *The Ammerican Ceramic Society*.
- Hudan dan MHD Falah. 2012. *Ash Boiler Sebagai Pengganti Semen dalam Desain Campuran Beton*. Civil Teknik Universitas Sumatra Utara.
- Huo, W, S. Yan, J.M. Wu. 2017. Metode Fabrikasi Baru untuk Busa Kaca dengan Ukuran Pori Kecil dan Struktur Pori yang Seragam. *Journal of American Ceramic Society*. Vol. 100. No. 12. Hal 5502– 5511.
- Husin, H., Mahidin, dan Marwan. 2011. Studi Penggunaan Katalis Abu Sabut Kelapa, Abu Tandan Sawit dan K_2CO_3 Untuk Konversi Minyak Jarak Menjadi Biodiesel. *Jurnal Reaktor*. Vol. 13.
- Jamizar, Iskandar, G. R., dan Prima, Y.P., 2013, Pemanfaatan Abu Kerak Boiler Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Tambahan (Admixture) Semen Terhadap Kuat Tekan Mortar ,Prodi Tehnik Sipil FT UNP, *J. Teknik sipil* No 3. Hal 1.
- Kamid, T. S., Subagia, I. 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.
- Lavrentyeva dan G. Grathwohl. 2007. Keramik Seluler dari Proses *foam agent* Otonom Suspensi Keramik, Bagian 1. *Keram. Jurnal*. Hal 88-93.
- Lim, H., S.H. Kim, dan B.K. Kim. 2008. Pengaruh Nilai Hidroksil Polioliol dalam Busa poliuretan. *Teknologi Polimer Lanjutan; Polim. Lanjut Technol*. No 19. Hal 1729–1734.
- Liu, Y., Jianjun X., Peng H., Ying S., Yonggen. dan Xiaoqing D. 2021. Study on Factors Affecting Properties of Foam Glass Made from Waste Glass. *Journal of Renewable Materials*. Vol 9. No 2.

- Marangoni, M., Secco., Parisatto., Artioli., Bernardo., Colombo., Altiasi., Binmajed., dan Binhussain. 2014. *Cellular glass-Ceramics from a self foaming mixture of glass and basalt scoria. Jurnal of Non-Crystalline Solids.*
- Michael. K. 2014. Trade of Industrial Insulations Phase 2. *Castleforbes House.* Dubin 1. Irlandia.
- Munasir, M., Triwikantoro, T., Zainuri, M., dan Darminto, D. 2012. Uji XRD dan XRF pada Bahan Mineral (batuan dan pasir) sebagai Sumber Material Cerdas (CaCO_3 dan SiO_2). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. Vol 2. No 1. Hal 20-29.
- Mursal, I. L. 2018. Karakterisasi XRD dan SEM Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore: Jurnal Sains dan Ilmu Farmasi*, Vol 2. No 3.
- Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Binhussain, M., Rafiza, A. R., dan Zarina, Y. 2012. *Effect of Na_2SiO_3 ratios on compressive streight of fly ash based geopolymer.* *ACI Material Journal*, (105), 503-508.
- Nasruddin., dan Aprillena T. B. 2018. Efek Penambahan Epdm pada Karet Alam terhadap Sifat Mekanik Karet Busa. *Jurnal Dinamika Penelitian Industri*. Vol 29. No 2.
- Nasrun, M dan Sujianto. 2020. Pembuatan dan Pengujian Fisis dan Mekanik Keramik Alumina Sebagai Komponen Keramik. *Jurnal Sains dan Teknologi*. Vol 16. No 02.
- Octaria, L., Ahmad F., dan Bahruddin. 2016. Pengaruh Suhu dan Waktu Sintering Terhadap Pembuatan Foam Glass Menggunakan Limbah Pecahan Kaca dan Abu Terbang (Fly Ash) dari Pabrik Sawit. *Jom FTEKNIK*. Vol 3. No 1.
- Olivia, M. 2015. Geopolimer sebagai Material Infrastruktur Berkelanjutan. *Annual Civil Engineering Seminar*, 6.
- Pratesa.Y., Suharno. B., Wardhana. A.,C dan Harjanto., S. 2019. *Application of Carbamide as Foaming Agent of FE-MN-C Alloy for Degradable Biomaterial Candidate with Powder Metallurgy Process.* Universitas Indonesia. Jakarta.
- Prianti, E., Malino, M. B., dan Lapanporo, B. P. 2015. Pemanfaatan Abu Kerak Boiler Hasil Pembakaran Limbah Kelapa Sawit Sebagai Pengganti Parsial Pasir pada Pembuatan Beton. *Positron*. Vol 5. No 1. Hal 26–29.
- Rahman, F., dan Fathurrahman, F. 2017. Pemanfaatan Hasil Pembakaran Limbah Cangkang Kelapa Sawit sebagai Bahan Pengganti Pasir pada Pembuatan Beton Normal. *Media Ilmiah Teknik Sipil*. Vol 6. No 1. Hal 30–40.
- Rajiman., Alisjahbana., Sofia W., Riyanto., Hery; Hasyim,Cholil; Setiawan, M. Ikhsan; Harmanto, Dani; Wajdi, dan Muh Barid Nizarudin. 2018. Substitusi Sumber Daya Lokal Batu Basal Scoria Lampung, Indonesia, Sebagai Agregat Bahan Baku Ketiga Untuk Meningkatkan Kualitas Portland Semen Komposit (PCC). *Jurnal Internasional Rekayasa & Teknologi*. Vol 7. No 2. Hal 484 – 490.

- Rashmi, B.J., D.Rusu, K. Prashantha, M.F.Lacrampe, dan P. Krawczak. 2013. Pengembangan Water-Blow Bio-Poliuretan Termoplastik Berbahan Dasar Busa Menggunakan Bio-Derived Chain Extender. *Jurnal Polimer Terapan Sains*. 584:361-365.
- Ridha, M., dan Darminto, D. 2016. Analisis densitas, porositas, dan struktur mikro batu apung Lombok dengan variasi lokasi dan kedalaman. *Jurnal fisika dan aplikasinya*. Vol 12. No 3.
- Rieshapsari, Adella M., Muhammad Z.M., Noor M.R., Salsabila N.A., Tiya A.P., Welly S., dan Muzani J. 2020. Potensi Sumber Daya Mineral Logam dan Non Logam di Provinsi Sumatra Barat. *Jurnal Georaflesia*. Vol 5. No 1.
- Saparuddin, D.I., Hisham, N.A.N., Aziz, S.A., Matori, K.A., Honda, S., Iwamoto, Y. and Zaid, M.H.M. 2020. Effect Of Sintering Temperature on The Crystal Growth, Microstructure and Mechanical Strength of Foam Glass-Ceramic from Waste Materials. *Journal of Materials Research and Technology*. Vol 9. No 3. Hal 5640–5647.
- Scarinci, G., Brusatin, E., dan Bernardo. 2005. *Teknologi Produksi Cellular Glass*, Wiley VCH, Weinheim, Jerman.
- Scarfato, P., L.D. Maio, dan L. Incarnato. 2017. *Struktur dan Fisik-Sifat Mekanik Terkait dengan reaksi Polyurethane yang fleksibel Busa untuk bercampur dan Pengaruh Pembusaan Buatan*. Bagian Komposit B 109:45-52.
- Settgast, C.Y., Ranglack, K. J., Hubalkova, M., Abendroth, M., Kuna, H., dan Biermann. 2019. Validasi Pendekatan Numerik Eksperimental untuk Perilaku Suhu Tinggi Busa Keramik Sel Terbuka, *J. Eur. Seram. Soc.* 39 ,610-617.
- Silva, R.V., de Brito, J., Lye, C.Q. and Dhir, R.K. 2017. The Role of Glass Waste in The Production of Ceramic-Based Products and Other Applications: A Review. *Journal of Cleaner Production*. No 167. Hal 346–364.
- Sousa, D.E., dan Rambo, C.R. 2008. *Microstructure and Properties of LZSA Glass Ceramic Foams*. Material Science and Engineering A.
- Souza M.T., Maia B.G.O., Teixeira L.B., Oliveira K.G., Teixeira A.H.B. and Oliveira A.P.N. 2017. Glass Foams Produced from Glass Bottles and Eggshell Wastes. *Process Safety Environmental Protection*. No 111. Hal 60–64.
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, dan Dimiyati, A. 2015. Studi *Scanning Electron Microscopy* (SEM) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*. Vol 9. No 2. Hal 44-50.
- Sunarya, Y. 2013. *Kimia Dasar 2 Berdasarkan Prinsip-Prinsip Kimia Terkini*. Bandung. Yrama Widya.
- Sun, Y., Jianzhou S., Fujie Z., Xiaoling T., Wenqing L., Yang W., Ran Z., Saonan X., Peiping Z., Cundi W., dan Shiding M. 2020. *Preparation of Nepheline Based Ceramic Foams from Basalt Tailing and Black Cotton Soil*. Waste and Biomass Valorization.

- Sutarno, S.S., Akhmad A.K., dan Tatacipta D. 2015. Pengaruh Kalsia Alumina ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) Pada Busa Aluminium AL-7000 Dengan Agen Pembusa Kalsium Karbonat (CaCO_3). *Prosiding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains*. Bandung.
- Swardika, D. P., Herlina, L., Laely, A., dan Kardin, F. 2019. Pengaruh Rasio Larutan Alkali Aktifator Berbasis Fly Ash Ex PLTU Suralaya Banten. *Prosiding Seminar Intelektual Muda, September*. Hal 314–319.
- Szycher, Michael. 2013. *Szycher's Handbook Of Polyurethanes*. Second Edition. CRC.Press. New York.
- Tumingan, Tjaronge, M. W., Victor, S., dan Rudy, D. 2016. Penyerapan Dan Porositas Pada Mortar Menggunakan Bahan *Pond Ash* sebagai Pengganti Pasir. *Jurnal Politeknologi*. Vol 15. No 1.
- Vricilia, Meylinda, Ahmad Ridwan, Agata Iwan Candra, 2020. Kuat Tekan Pelat Beton Menggunakan Pasir Wlingi Dan Wiremesh Diameter 4 Mm. *Jurnal Manajemen Teknologi & Teknik Sipil*. Vol 3. No 2.
- Wu, J.P., Boccaccini, A.R., Lee, P.D., Kershaw, M.J., and Rawlings, R.D. 2006. Glass Ceramic Foams from Coal Ash and Waste Glass: *Production and Characterization*. *Advances in Applied Ceramics*. Vol 105. No 1. Hal 32-39.
- Zahrina, I. 2007. Pemanfaatan Abu Sabut dan Cangkang Sawit sebagai Sumber Silika pada Sintesis ZSM-5 dari Zeolit Alam. *Jurnal Sains dan Teknologi*. Vol 6, No 2. Hal 31-34.
- Zhou, H. X. Ge, M. Wang, Z. Liu, H. dan Wu, X. Chen. 2018. Persiapan dan Karakterisasi Busa Keramik dari Terak Kromium dan Abu Dasar Batubara, *Seram*. Int. 44. 11888-11891.