

**PENGARUH KOMPOSISI BAHAN, SUHU DAN LAMA WAKTU
PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK GEOPOLIMER**

(Skripsi)

Oleh

Linda Herviana

1917041040



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

2024

ABSTRAK

PENGARUH KOMPOSISI BAHAN, SUHU DAN LAMA WAKTU PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK GEOPOLIMER

Oleh

Linda Herviana

Telah dilakukan pembuatan geopolimer menggunakan bahan campuran limbah bata api, serbuk basalt dan alkali aktivator. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pembuatan geopolimer dari campuran limbah bata api dan serbuk basalt, mengetahui sifat fisis (massa jenis, porositas, absorpsi), karakteristik morfologi, fasa kristal, komposisi unsur dan gugus fungsi. Variasi komposisi limbah bata api dan serbuk basalt yaitu 70:30% ; 80:20% ; dan 90:10% dengan variasi suhu pemanasan sebesar 60, 110, 160 dan 210°C selama 5 jam. Selanjutnya dilakukan uji fisis dan karakterisasi XRF, XRD, FTIR dan SEM-EDS. Uji fisis pada semua sampel menunjukkan hasil terbaik pada komposisi 70:30% dengan suhu pemanasan 160°C selama 5 jam diperoleh nilai porositas sebesar 50,51% dan nilai absorpsi sebesar 47,30% dengan nilai massa jenis sebesar 0,65 g/cm³. Hasil karakterisasi XRF menunjukkan Si, Fe, Al dan Ca merupakan unsur yang dominan. Hasil analisis XRD menunjukkan fasa yang terbentuk pada sampel geopolimer yaitu *quartz* (SiO₂), *cristobalite* (SiO₂), *orthoclase* (Si_{11.92}Al_{4.08}K_{4.00}O_{32.00}), *labradorite* (Ca_{2.68}Na_{1.32}Si_{9.32}Al_{6.68}O_{32.00}), *siderite* (Fe_{6.00}C_{6.00}O_{18.00}) dan *ferrosilite* (Fe_{6.40}Ca_{1.60}Si_{8.00}O_{24.00}). Hasil analisis FTIR menunjukkan terbentuknya gugus fungsi Si-O pada bilangan gelombang 1012 cm⁻¹ dan Si-O-Al pada bilangan gelombang 970-1090 cm⁻¹. Kemudian hasil SEM-EDS menunjukkan adanya pori-pori dan retakan internal yang tersegmentasi di seluruh permukaan sampel geopolimer, dengan penyebaran unsur Si yang paling dominan.

Kata Kunci : Geopolimer, Limbah Bata Api, Basalt, Silikat, Aluminat

ABSTRACT

THE INFLUENCE OF MATERIAL COMPOSITION, TEMPERATURE AND HEATING TIME ON GEOPOLYMER CHARACTERISTICS

By

Linda Herviana

Geopolymer has been made using a mixture of fire brick waste, basalt powder and alkali activator. This study aims to determine the manufacture of geopolymers from a mixture of fire brick waste and basalt powder, physical properties (density, porosity, absorption), morphological characteristics, crystal phases, elemental composition and functional groups. The composition variations of fire brick waste and basalt powder are 70:30%; 80:20%; and 90:10% with heating temperature variations of 60, 110, 160 and 210°C for 5 hours. Further physical tests and characterisation of XRF, XRD, FTIR and SEM-EDS were conducted. Physical tests on all samples showed the best results in the composition of 70:30% with a heating temperature of 160 °C for 5 hours obtained a porosity value of 50.51% and an absorption value of 47.30% with a density value of 0.65 g/cm³. XRF characterisation results show Si, Fe, Al and Ca are the dominant elements. The results of XRD analysis show that the phases formed in the geopolymer samples are quartz (SiO₂), cristobalite (SiO₂), orthoclase (Si_{11.92}Al_{4.08}K_{4.00}O_{32.00}), labradorite (Ca_{2.68}Na_{1.32}Si_{9.32}Al_{6.68}O_{32.00}), siderite (Fe_{6.00}C_{6.00}O_{18.00}) and ferrosilite (Fe_{6.40}Ca_{1.60}Si_{8.00}O_{24.00}). FTIR analysis showed the formation of Si-O functional groups at wave number 1012 cm⁻¹ and Si-O-Al at wave number 970-1090 cm⁻¹. Then the SEM-EDS results show the presence of pores and segmented internal cracks on the entire surface of the geopolymer sample, with the distribution of the most dominant Si element.

Keywords : *Geopolymer, Fire Brick Waste, Basalt, Silicate, Aluminate*

**PENGARUH KOMPOSISI BAHAN, SUHU DAN LAMA WAKTU
PEMANASAN TERHADAP KARAKTERISTIK GEOPOLIMER**

Oleh

LINDA HERVIANA

SKRIPSI

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
SARJANA SAINS**

Pada

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



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2024**

Judul : **PENGARUH KOMPOSISI BAHAN, SUHU
DAN LAMA WAKTU PEMANASAN
TERHADAP KARAKTERISTIK GEOPOLIMER**

Nama Mahasiswa : **Linda Herviana**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1917041040

Jurusan : Fisika

Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI,

1. Komisi Pembimbing

Pembimbing I

Pembimbing II

Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.
NIP. 195903081991031001

Dr. Sudiby, S.T., M.Sc.
NIP. 1982003272015021002

2. Ketua Jurusan Fisika

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

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D

Sekretaris : Dr. Sudibyo, S.T., M.Sc.

Penguji Bukan Pembimbing : Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D.

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



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

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 2 Juli 2024

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya atau pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang 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 hukuman yang berlaku.

Bandar Lampung, 2 Juli 2024



Linda Herviana
NPM. 1917041040

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Linda Herviana, dilahirkan pada tanggal 29 Maret 2000 di Adiluwih, Pringsewu. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara pasangan Bapak Tohirudin dan Ibu Nasipah. Penulis menyelesaikan pendidikan tingkat dasar di SD Negeri 1 Adiluwih pada tahun 2006-2012. Kemudian melanjutkan pendidikan tingkat menengah di SMP Negeri 1 Adiluwih pada tahun 2012-2015 dan melanjutkan pendidikan tingkat menengah atas di SMA Negeri 1 Adiluwih pada tahun 2015-2018. Penulis diterima di jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2019 melalui jalur penerimaan Seleksi Bersama Masuk Perguruan Tinggi Negri (SBMPTN) dan mengambil konsentrasi dalam bidang Material Fisika.

Selama menjalani pendidikan tinggi tersebut, penulis juga aktif dalam organisasi Unit Kegiatan Mahasiswa (UKM) Penelitian pada tahun 2019-2021 sebagai anggota. Penulis melakukan praktik kerja lapangan di Laboratorium Lingkungan Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Lampung pada tahun 2022 Penulis juga pernah melakukan pengabdian masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung pada tahun 2022 di Desa Pelindung Jaya, Kecamatan Gunung Pelindung, Kabupaten Lampung Timur. Penulis juga menyelesaikan penelitian skripsi di Laboratorium Non Logam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), yang bertempat di Tanjung Bintang, Lampung Selatan dengan judul **“Pengaruh Komposisi Bahan, Suhu dan Lama Waktu Pemanasan Terhadap Karakteristik Geopolimer”**.

MOTTO

**“Allah tidak membebani seseorang di luar batas
kemampuannya”
(Q.S. 2:286)**

“Try Best, Pray More”

**”Kamu bisa menjadi satu dari sejuta. Jangan berkecil hati dengan
peluang untuk berhasil” – David Beckham**

PERSEMBAHAN

Segala puji dan syukur kepada Allah SWT. Atas rahmat karunia-Nya, sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik, maka ku persembahkan skripsi ini kepada:

Kedua Orang Tuaku Tercinta

Teruntuk kedua orangtuaku, Bapak Tohirudin dan Ibu Nasipah yang selalu hebat. Terimakasih telah menjadikan anakmu kuat, hingga bisa menyelesaikan pendidikan S1 ini

Adikku Tercinta

Kepada adikku Tiyas Wulandari, terimakasih sudah selalu membantu, mendukung dan mendoakanku

Universitas Lampung

Almamater tempatku bertumbuh

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa, yang telah memberikan kemudahan, kelancaran dan berkat karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan proposal penelitian ini yang bertempat di Laboratorium Non-Logam, Pusat Riset Teknologi dan Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan dengan judul **“Pengaruh Komposisi Bahan, Suhu dan Lama Waktu Pemanasan Terhadap Karakteristik Geopolimer”**. Proposal penelitian ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam menyelesaikan Tugas Akhir dan syarat memenuhi salah satu mata kuliah wajib di Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan laporan masih banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar penulisan berikutnya lebih baik. Harapannya laporan ini dapat bermanfaat dan dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.

Bandar Lampung, 2 Juli 2024

Linda Herviana
NPM. 1917041040

SANWACANA

Puji dan syukur penulis ucapkan kepada Allah SWT atas berkah, rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dengan kerendahan dan ketulusan hati, penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung dan membantu dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. selaku Pembimbing Utama yang telah bersedia memberikan bimbingan, saran dan masukan selama penulisan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Sudibyso, S.T., M.Sc. selaku dosen Pembimbing Kedua yang telah bersedia meluangkan banyak waktu selama penyusunan skripsi ini.
3. Bapak Muhammad Amin, S.T. selaku Pembimbing Lapangan yang telah membantu selama proses penelitian dan penyusunan skripsi ini.
4. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah berkenan memberikan masukan dan saran yang membangun kepada penulis.
5. Bapak Arif Surtono, S.Si., M.Eng. sebagai dosen pembimbing akademik yang telah banyak membantu selama proses perkuliahan.
6. Bapak Dr. Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Orang tua penulis Bapak Tohirudin dan Ibu Nasipah yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tiada henti.
8. Adikku Tiyas Wulandari yang selalu memberikan dukungan dan doa kepada penulis.

9. Sahabat-sahabat “Bismillah Sukses” Andrean Johandra, Muhammad Rizki, Fegi Liani dan Hikmah Nurcahayaniati yang selalu menjadi teman diskusi yang baik dan selalu memberikan doa dan semangat.
10. Teman seperjuangan Deska Megasari yang selalu kebersamai selama proses penelitian dan penulisan skripsi.
11. Teman-teman seperjuangan Fisika 2019, terimakasih atas kebersamaannya selama ini.
12. Serta semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah memberikan doa dan dukungan kepada penulis.

Bandar Lampung, 2 Juli 2024

Penulis,

Linda Herviana

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
PENGESAHAN	v
LEMBAR PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Geopolimer	7
2.2 Larutan Alkali Aktivator	8
2.3 Bahan Baku Geopolimer	10
2.4 Sifat Fisis	12
2.4.1 Massa Jenis.....	12
2.4.2 Porositas	13

2.4.3 Absorpsi	14
2.5 Karakterisasi Material	14
2.5.1 <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF).....	15
2.5.2 <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	17
2.5.3 <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS).....	19
2.5.4 <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR).....	23
III. METODE PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	26
3.2 Alat dan Bahan.....	26
3.2.1 Alat.....	26
3.2.2 Bahan	26
3.3 Prosedur Penelitian	26
3.3.1 Preparasi Bahan Baku	27
3.3.2 Pembuatan Geopolimer.....	27
3.4 Pengujian Sampel.....	29
3.4.1 Uji Fisis (Massa Jenis, Porositas dan Absorpsi)	29
3.4.2 Karakterisasi XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR.....	29
3.5 Diagram Alir	30
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Hasil Uji Fisis Geopolimer Berbahan Dasar Limbah Bata Api dan Basalt.....	33
4.2 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	39
4.2.1 Hasil Karakterisasi XRF Limbah Bata Api dan Batu Basalt	39
4.2.2 Hasil Analisis XRF Geopolimer	41
4.3 Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) Geopolimer	42
4.3.1 Hasil Analisis Kualitatif XRD Geopolimer	42
4.3.2 Hasil Analisis Kuantitatif XRD Geopolimer	45
4.4 Hasil Karakterisasi <i>Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS) Geopolimer	48
4.5 Hasil Karakterisasi <i>Fourier Transform Infrared Spectroscopy</i> (FTIR) pada Sampel Geopolimer.....	54
V. KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	57
5.2 Saran.....	58
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Reaksi Polikondensasi oleh alkali	7
Gambar 2.2 Prinsip kerja alat XRF	16
Gambar 2.3 Skema difraksi sinar-X	18
Gambar 2.4 Analisis XRD geopolimer dibandingkan dengan bahan baku metakaolin	19
Gambar 2.5 Skema Kerja SEM	20
Gambar 2.6 Morfologi sampel geopolimer	22
Gambar 2.7 Skema FTIR.....	23
Gambar 2.8 Spektrum FTIR bahan baku dan geopolimer.....	24
Gambar 3.1 Preparasi bahan baku	30
Gambar 3.2 Pembuatan larutan alkali aktivator	31
Gambar 3.3 Pembuatan geopolimer	32
Gambar 4.1 Grafik porositas (P) sampel geopolimer	33
Gambar 4.2 Grafik absorpsi (A) sampel geopolimer	35
Gambar 4.3 Grafik massa jenis (ρ) sampel geopolimer	37
Gambar 4.4 Hasil karakterisasi XRD sampel geopolimer.....	43
Gambar 4.5 Hasil <i>refinement</i> XRD sampel K1.60° dan K1.160°	46
Gambar 4.6 Hasil karakterisasi SEM-EDS geopolimer K1.60°	48

Halaman

Gambar 4.7 Morfologi SEM sampel geopolimer K1.60° 50

Gambar 4.8 Hasil karakterisasi SEM-EDS geopolimer K1.160° 51

Gambar 4.9 Morfologi SEM sampel geopolimer K1.160° 53

Gambar 4.10 Hasil karakterisasi FTIR sampel geopolimer 55

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Hasil Karakterisasi XRF Geopolimer Berbahan Dasar Metakaolin dan Lumpur Sidoarjo.....	17
Tabel 3.1 Komposisi Bahan Geopolimer	28
Tabel 4.1 Hasil Analisis XRF Limbah Bata Api dan Batu Basalt.....	39
Tabel 4.2 Hasil Analisis XRF Geopolimer.....	41
Tabel 4.3 Fasa XRD pada Sampel Geopolimer.....	44
Tabel 4.4 Hasil parameter <i>refinement</i> data XRD geopolimer	47
Tabel 4.5 Komposisi unsur sampel geopolimer K1.60° menggunakan EDS.....	49
Tabel 4.6 Komposisi unsur sampel geopolimer K1.160° menggunakan EDS.....	52

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Peningkatan kebutuhan semen sebagai salah satu material konstruksi menyebabkan produksi semen ikut meningkat. Asosiasi Semen Indonesia (ASI) menyebutkan, pada tahun 2021 konsumsi semen domestik tercatat mencapai 65,2 juta ton. Angka ini naik 4,3% dari tahun 2020 yang mencapai 62,5 juta ton. Pembuatan semen dilakukan dengan proses pembakaran menggunakan batu bara. Hal ini mengakibatkan lepasnya karbon dioksida (CO_2) dalam jumlah konsentrasi besar ke atmosfer. Umumnya untuk setiap ton produksi semen, melepaskan satu ton CO_2 di atmosfer. Secara global industri semen berkontribusi memproduksi 5-7% dari total CO_2 di seluruh dunia (Davidovits, 1994).

Produksi CO_2 yang berlebih tersebut dapat menyebabkan pemanasan global sehingga terjadi perubahan iklim yang semakin tidak teratur. Geopolimer menjadi salah satu pilihan terbaik dalam upaya mengurangi pemanasan global, karena dapat meminimalkan emisi CO_2 dari manufaktur semen hingga 80% (Gartner, 2004). Geopolimer disintesis dari bahan alam anorganik silika alumina melalui proses polimerisasi. Geopolimer dianalisis sebagai salah satu material yang ramah lingkungan karena pembuatannya tidak melalui proses pembakaran sehingga tidak memancarkan emisi CO_2 (Li *et al.*, 2004).

Struktur geopolimer terbentuk melalui polimerisasi silika dan alumina. Struktur yang dihasilkan diperkirakan mirip dengan zeolit. Geopolimer umumnya digunakan untuk menggambarkan kelas bahan pengikat aluminosilikat tiga dimensi amorf yang disintesis dari bubuk aluminosilikat dan larutan alkali hidroksida atau logam alkali silikat yang sangat pekat. Sintesis geopolimer biasanya menggunakan produk samping industri (silika panas bumi, *fly ash*, *bottom ash*, dan terak logam) atau mineral tanah (kaolinit, metakaolinit dan bentonit) (Olvianas dkk., 2017).

Bahan kaya silika seperti *fly ash*, *slag*, sekam padi dan bahan kaya aluminium seperti tanah liat yang termasuk kaolin dan bentonit adalah bagian utama dari pengembangan geopolimerisasi. Geopolimer tidak dapat mereaksikan ikatan antar molekulnya sendiri. Sehingga dalam pembuatan geopolimer dibutuhkan larutan alkali yang berfungsi sebagai pengaktif reaksi polimerisasi. Larutan alkali yang umum digunakan adalah natrium hidroksida (NaOH) atau kalium hidroksida (KOH) dengan natrium silikat (Na_2SiO_3) atau kalium silikat (K_2SiO_3) (Gourley and Johnson, 2005).

Bahan baku utama yang diperlukan untuk pembuatan geopolimer adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur SiO_2 dan Al_2O_3 , salah satu bahan baku yang banyak mengandung unsur silika dan alumina adalah batu basalt. Secara kimiawi basalt terdiri dari beberapa oksida utama yaitu silika, alumina, oksida besi, kalsia, magnesia dan juga mengandung soda, potassia, titania, mangan dan oksida fosfor, serta lainnya. Berdasarkan pengujian komposisi kimia batu mineral basalt yang berasal dari Kabupaten Lampung Timur diperoleh

komposisi kimia SiO_2 sebesar 56,15% dan Al_2O_3 sebesar 17,37% (Amin & Suharto, 2017).

Selain itu bahan mineral tanah dan produknya juga dapat digunakan sebagai bahan baku dalam pembuatan geopolimer, seperti limbah bata api bekas. Bata api dapat digunakan untuk menahan suhu tinggi sebagai bahan konstruksi. Biasanya bata api terbuat dari *fire clay*. Jenis tanah ini dapat menahan suhu tinggi tanpa mengalami perubahan sifat struktural yang berarti seperti meleleh atau melunak. Berdasarkan penelitian Chirikure (2010), bata api dihasilkan dari campuran tanah liat, dimana kandungan alumina yang dominan akan menghasilkan fase *mullite* dan *corundum*. Sementara itu komposisi dengan kandungan silika tinggi, lebih sering disebut dengan *fireclay* silika.

Ferdana (2015) melakukan penelitian geopolimer menggunakan bahan baku lumpur sidoarjo dan metakaolin dengan perbandingan komposisi bahan 75%:25%; 50%:50% dan 25%:75%. Amin dkk. (2019) melakukan penelitian geopolimer berbahan material perlit, basalt dan feldspart dengan variasi NaOH 15, 25, 35 dan 45 M. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa besar konsentrasi NaOH sangat berpengaruh terhadap nilai absorpsi dan porositas. Pertiwi (2019) melakukan penelitian Pengaruh Variasi Konsentrasi Mineral Basalt dan Sodium Hidroksida Terhadap Sifat Fisis dan Karakteristik Produk Geopolimer. Pada penelitian tersebut perbandingan variasi mineral basalt dan NaOH yang dipakai yaitu, 69,5%:2,5%; 67%:5% dan 64,5% :7,5%.

Meskipun sebagian besar penelitian geopolimer terfokus sebagai material pengganti semen dan aplikasi beton, material ini dapat digunakan dalam sistem

pendingin evaporatif (Emdadi *et al.*, 2016). Geopolimer juga sangat baik bila digunakan sebagai bahan berpori anorganik hijau modern. Struktur mikro geopolimer memiliki pori-pori yang lebih tidak beraturan dengan luas permukaan spesifik yang lebih besar dan struktur jaring tiga dimensi cocok untuk menangkap zat yang teradsorpsi. Adsorpsi dapat digunakan untuk pemurnian, penghilangan warna, pemisahan, penghilangan bau, konsentrasi, dan detoksifikasi (Xu *et al.*, 2022). Penelitian lain menyebutkan geopolimer dapat diaplikasikan sebagai bahan tahan panas dan tahan api, sebagai penguat serat karbon, bahan komposit dan keramik anorganik, (Wu *et al.*, 2014; Wu dan Feng, 2011; Ge *et al.*, 2015).

Berdasarkan uraian di atas, dilakukan penelitian pembuatan geopolimer menggunakan bahan utama limbah bata api bekas dan serbuk batu basalt dengan komposisi bahan 70%:30% , 80%:20% , dan 90%:10%. Penelitian ini dilakukan dengan campuran larutan alkali yaitu NaOH dan Na₂SiO₃ kemudian dicetak dengan pipa ukuran ½ inchi. Geopolimer dikeringkan pada suhu pemanasan 60, 110, 160 dan 210°C selama 5 jam. Selanjutnya dilakukan uji terhadap sifat fisis geopolimer (massa jenis, porositas dan absorpsi) dan uji karakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia bahan uji, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fase kristal pada bahan uji dan *Scanning Electron Microscopy- Energy Dispersive Spectroscopy* (SEM-EDS) untuk mengetahui morfologi geopolimer, serta *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi pada unsur yang terbentuk pada sampel geopolimer.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Bagaimana pembuatan geopolimer yang menggunakan campuran limbah bata api bekas?
2. Bagaimana pembuatan geopolimer yang menggunakan bahan baku batu basalt?
3. Bagaimana pengaruh variasi komposisi bahan baku terhadap karakteristik geopolimer?
4. Bagaimana pengaruh variasi suhu dan lama waktu pemanasan terhadap karakteristik geopolimer?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Memanfaatkan limbah bata api bekas dan basalt menjadi geopolimer.
2. Mengetahui hasil uji fisis (massa jenis, porositas dan absorpsi) pada geopolimer.
3. Mengetahui fasa yang terbentuk pada geopolimer dengan karakterisasi XRD.
4. Mengetahui morfologi pada geopolimer dengan karakterisasi SEM-EDS.
5. Mengetahui gugus fungsional pada geopolimer dengan karakterisasi FTIR.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Limbah bata api bekas yang digunakan berasal dari PRTP-BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

2. Mineral basalt yang digunakan berasal dari Lampung Timur. Menggunakan larutan alkali dari campuran NaOH 10 M dan Na₂SiO₃.
3. Menggunakan cetakan pipa ukuran ½ inchi.
4. Suhu yang digunakan pada pemanasan geopolimer sebesar 60, 110, 160 dan 210°C selama 5 jam.
5. Uji fisis yang dilakukan seperti massa jenis, porositas dan absorpsi.
6. Uji karakterisasi yang digunakan yaitu XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR.

1.5 Manfaat Penelitian

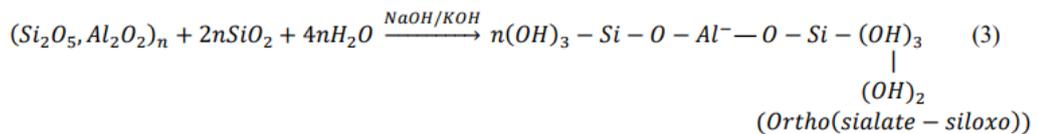
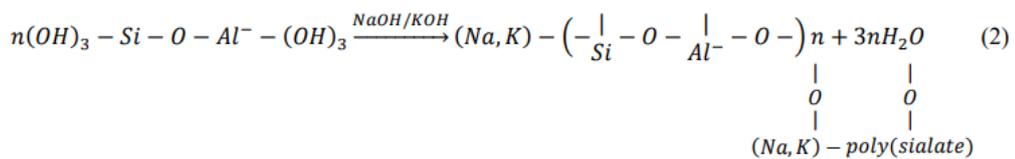
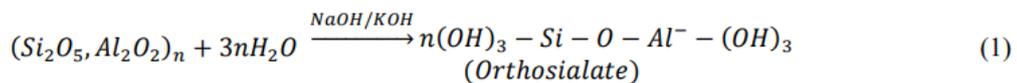
Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut.

1. Mengetahui pengaruh limbah bata api dan serbuk batu basalt dalam pembuatan geopolimer.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi mengenai pemanfaatan limbah bata api bekas dan batu basalt menjadi bahan alternatif geopolimer.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Geopolimer

Geopolimer merupakan polimer anorganik yang terdiri dari rantai tetrahedral-tetrahedra SiO_4 dan AlO_4 . Geopolimer dapat dibuat dengan mereaksikan sumber aluminosilikat dengan larutan alkali (Davidovits, 1994). Geopolimer juga didefinisikan sebagai material polimer anorganik dengan jaringan 3 dimensi yang berstruktur amorf. Struktur ini dihasilkan melalui proses polimerisasi yang melibatkan proses disolusi dan polikondensasi prekursor aluminosilikat. Geopolimer sendiri juga sering disebut sebagai "*mineral polymers*" dan "*polymer glasses*" (Sidik, 2012).



Gambar 2.1 Reaksi Polikondensasi oleh alkali.

Proses sintesis geopolimer menggunakan 2 jenis bahan baku (prekursor) yaitu sumber material dan larutan alkali. Pada sumber material harus memiliki

kandungan utama silika (SiO_2) dan aluminium (Al_2O_3) yang dapat berasal dari mineral alam seperti kaolin maupun limbah buangan dari industri seperti *fly ash*, *silica fume*, ampas biji besi (*blast furnace slag*) dan lain-lain, sedangkan larutan alkali yang digunakan dalam mengaktivasi prekursor geopolimer berupa *sodium hydroxide* (NaOH), *potassium hydroxide* (KOH), *sodium silicate* (Na_2SiO_3) dan *potassium silicate* (K_2SiO_3). Silika (Si) dan Aluminium (Al) memainkan peran kunci dalam ikatan polimerisasi. Rangkaian panjang AlO_4 dan SiO_4 akan dihasilkan dari reaksi aluminium dan silika di bahan dasar dengan larutan alkali. Poli (sialat) tipe (-Si-O-Al-O-), poli (sialat-silokso) tipe (-Si-O-Al-O-Si-O-), dan poli (sialat-disilokso) tipe (Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-), merupakan 3 jenis ikatan poli (sialat) dalam geopolimer (Davidovits, 1994). Geopolimer terbuat dari senyawa aluminosilikat sebagai bahan dasar dan aktivator dalam bentuk larutan alkali hidroksida dan (atau) silikat alkali. Ketika alkali melarutkan aluminosilikat, monomer $\text{Si}(\text{OH})_4$ dan $\text{Al}(\text{OH})_4$ terbentuk, yang kemudian terpolikondensasi menjadi polimer alkali aluminosilikat dengan struktur jaringan berkat penciptaan ikatan silang 3 dimensi (Davidovits, 1994).

2.2 Larutan Alkali Aktivator

Larutan alkali aktivator sangat berperan penting dalam proses geopolimerisasi. Larutan alkali pada reaksi geopolimerisasi, berperan untuk memecah bahan alumina silikat menjadi monomer Si dan Al. Pada pembuatan geopolimer, aktivator yang digunakan adalah unsur alkali yang terhidrasi. Penggunaan hidroksida alkali sebagai aktivator reaksi geopolimer karena unsur silika dalam geopolimer merupakan asam kuat sehingga zat tersebut harus direaksikan dengan basa kuat yang berupa Natrium hidroksida (NaOH) (Triwulan *et al.*, 2007).

NaOH atau dikenal sebagai soda api atau soda kaustik yang merupakan sejenis dari basa logam kaustik. Pada umumnya larutan NaOH yang memiliki sifat basa kuat digunakan dalam reaksi dengan asam lemah, seperti natrium karbonat, dimana asam lemah tidak efisien. Keasaman air bisa dikendalikan dengan NaOH serta bahan tersebut dapat mengendapkan logam berat (Riana, 2012). Unsur Al dan Si dalam bahan geopolimer bereaksi dengan natrium hidroksida (NaOH), membentuk hubungan polimer yang kuat. NaOH umumnya ditemukan dalam serpihan dengan kemurnian 98%. NaOH tersedia dalam serpihan, pelet, dan 12 bentuk bubuk selain serpihan. NaOH pertama-tama harus dilarutkan dalam aquades ke molaritas yang diperlukan sebagai aktivator (Kumar dkk., 2019). Hamidi dkk, (2016) mengungkapkan bahwa peningkatan molaritas menyebabkan disosiasi spesi aktif bahan baku, menghasilkan penciptaan lebih banyak jaringan gel geopolimer. Namun karena kelebihan ion OH yang berlebih sehingga reaksi yang terjadi tidak efisien, konsentrasi NaOH yang terlalu tinggi dapat mengganggu proses geopolimerisasi.

Natrium silikat (Na_2SiO_3), sering dikenal sebagai *waterglass*, adalah kristal putih yang dapat larut dalam air (*soluble glass*) untuk menghasilkan larutan alkali. Dalam larutan murni dan basa, Na_2SiO_3 selalu stabil. Ion silikat bergabung dengan ion hidrogen dalam larutan asam untuk menghasilkan asam silikat, yang ketika dipanaskan dan dibakar membentuk gel silika keras dan jernih yang menyerap air dengan cepat (Fairus dkk., 2009). Semakin besar jumlah Na_2SiO_3 , semakin tinggi viskositas dan semakin cepat proses produksi pengikat. Selain itu, meningkatkan jumlah Na_2SiO_3 dalam campuran geopolimer meningkatkan jumlah SiO_2 yang mempengaruhi kuat tekan geopolimer (Sengkey dkk., 2020).

2.3 Bahan Baku Geopolimer

Bata api termasuk dalam kelompok keramik refraktori, karena kemampuannya dalam menahan temperatur yang tinggi. Material ini stabil terhadap perubahan kimia, tidak terdeformasi pada temperatur tinggi, tahan korosi dan perubahan temperature. Kemampuan ini membuat bata tahan api banyak dimanfaatkan dalam berbagai industri seperti peleburan logam dan gelas, serta pelapis pada tungku atau klin (Faizah, 2016).

Bata api biasanya juga digunakan sebagai konstruksi tungku pembakaran, sehingga dalam jangka waktu tertentu harus diganti. Proses ini dapat menyebabkan menumpuknya limbah bata api jika tidak ditangani dengan benar. Alternatif yang dapat dilakukan yaitu dengan memanfaatkan limbah bata api menjadi bahan baku geopolimer, karena mengandung mineral seperti silika, alumina dan kalsium yang dapat bereaksi dengan larutan alkali untuk pembentukan struktur geopolimer. Hal ini sesuai dengan penelitian bahwa hasil analisis XRF bata api dengan komposisi SK.34 memiliki kandungan silika alumina yang tinggi mencapai 84,39% (Amin dkk., 2018). Kandungan silika yang tinggi pada bata api disebabkan karena bahan baku yang digunakan untuk membuat bata api biasanya berupa mineral lempung alam, kaolin, metakaolin, *ball clay*, *fire clay* yang kaya akan silika (Darwanta, 2019). Selain itu, penggunaan limbah bata api sebagai bahan geopolimer membantu dalam mengurangi jumlah limbah konstruksi yang dibuang ke lingkungan, sehingga mendukung prinsip keberlanjutan dan daur ulang.

Batu basalt termasuk batuan beku yang memiliki sebaran merata hampir seluruh

Indonesia menurut peta geologi. Di kepulauan Natuna batuan tertua terdapat batuan beku basalt dan di Pulau Midai di barat daya kepulauan Natuna terdapat vulkanik basalt. Selanjutnya di wilayah Sumatera bagian barat terdapat batuan basalt, hal itu dikarenakan Sumatera bagian barat tersusun atas endapan batuan tersier yang sangat tebal dan bersifat resistensi terhadap erosi kecil (Yuliansyah dan Sujatmiko, 2019).

Di Provinsi Lampung batuan basalt tersebar di Kecamatan Mataram Baru, Jabung, Bumi Agung, Marga Tiga, Sukadana dan Labuhan Maringgai di Kabupaten Lampung Timur. Potensi batu basalt di Lampung Timur belum dimanfaatkan secara maksimal. Biasanya hasil akhirnya berupa batu pecah yang digunakan untuk bahan bangunan atau konstruksi sipil, sehingga nilai tambahnya sangat rendah. Batu basalt biasanya berbutir halus karena kristalisasi dari lava di permukaan bumi. Basalt digunakan sebagai material dalam bentuk batuan yang dihancurkan, sebagai material konstruksi, serta dalam teknik industri dan pembangunan jalan raya. Secara kimiawi basalt terdiri dari beberapa oksida utama yaitu silika, alumina, oksida besi, kalsia, magnesia dan juga mengandung soda, potassia, titania, mangan dan oksida fosfor, serta lainnya. Basalt juga mengandung butiran kecil *pyroxene*, *olivine*, *biotite*, *hornblade*, kuarsa dan juga plagioklas feldspar (Isnugroho *et al.*, 2018).

Hasil analisis XRF batu basalt yang berasal dari Mataram Baru menunjukkan, basalt memiliki komposisi mineral silika alumina dengan konsentrasi mencapai 60-70% (Birawida dkk, 2019; Amin dan Suharto, 2017). Basalt menunjukkan potensi untuk menjadi alternatif bahan pembuatan geopolimer melalui proses

aktivasi alkali. Dalam pembuatan geopolimer basalt dapat digunakan sebagai tambahan bahan pereaktif pada saat terjadinya proses geopolimerisasi karena komposisi mineralnya yang kaya akan silika alumina yang dapat bereaksi dengan alkali untuk membentuk struktur geopolimer, atau dapat digunakan sebagai bahan berpori pada geopolimer (Ghellera *et al.*, 2021).

2.4 Sifat Fisis

Pengujian dilakukan pada suatu material untuk menentukan kualitas fisisnya. Berikut pengujian fisis diantaranya:

2.4.1 Massa Jenis

Rasio volume material pada suhu terhadap berat air dengan volume yang sama pada suhu tersebut disebut massa jenis (*specific gravity*) (Laoli *et al.*, 2013). Massa jenis adalah bentuk fisik yang menggambarkan kepadatan pengikatan bahan material. Jenis dan kuantitas mineral, porositas, dan rongga pengisi cairan mempengaruhi tingkat massa jenis material. Jika suatu material mempunyai nilai massa jenis yang besar maka molekul penyusunnya semakin rapat. Standar pengujian nilai massa jenis menggunakan SNI 03-1969-1990 seperti pada persamaan (2.1).

$$\rho = \frac{m_1}{m_2 - m_3} \times \rho_{air} \quad (2.1)$$

dengan ρ merupakan massa jenis (g/cm^3), m_1 sebagai massa kering (g), m_2 sebagai massa jenuh (g), m_3 sebagai massa yang berada di dalam air (g), dan ρ_{air} sebagai massa jenis air (g/cm^3).

2.4.2 Porositas

Porositas dapat didefinisikan sebagai perbandingan volume pori-pori (volume yang ditempati oleh fluida) terhadap volume total suatu material (Sutapa, 2011). Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas suatu material. Porositas juga dapat diakibatkan adanya partikel-partikel bahan penyusun material yang relatif besar, sehingga kerapatan tidak maksimal. Sifat porositas bahan saling mempengaruhi dan dipengaruhi oleh besaran fisis yang lain maupun sifat termalnya, misalnya bahan yang poros akan mempunyai nilai kerapatan yang rendah, luas permukaan yang lebih besar, konduktivitas panas yang rendah. Nilai uji porositas dapat diketahui dengan standar pengujian ASTM C 642-97 seperti pada persamaan (2.2).

$$P = \frac{m_2 - m_1}{m_2 - m_3} \times 100\% \quad (2.2)$$

dengan P merupakan nilai porositas (%), m_1 sebagai massa kering (g), m_2 sebagai massa jenuh (g), m_3 sebagai massa yang berada di dalam air (g).

Amin dkk. (2019), melakukan penelitian pembuatan geopolimer berbahan dasar material perlit, basalt, metakaolin dan feldspart dengan variasi NaOH 15, 25, 35 dan 45 M. Berdasarkan hasil penelitian nilai porositas terendah menggunakan campuran material basalt dan metakaolin yaitu sebesar 20,73%. Sedangkan nilai porositas tertinggi didapatkan pada campuran material perlit dan metakaolin yaitu sebesar 48,16%.

2.4.3 Absorpsi

Pengujian daya serap air atau absorpsi dilakukan untuk mengetahui banyaknya kadar air yang terserap oleh geopolimer. Uji absorpsi dilakukan dengan prinsip perendaman dalam air dengan waktu perendaman 24 jam. Nilai penyerapan berkaitan dengan nilai porositas dari semen geopolimer, semakin turun juga nilai penyerapan karena semakin turun nilai porositas maka semakin kecil pori-pori yang ada pada semen geopolimer maka semakin sedikit pula rongga kosong yang dapat menyerap sejumlah air (Amin & Suharto, 2017).

Untuk standar pengujian absorpsi digunakan SNI 03-6433-2000 dapat diketahui pada persamaan (2.3).

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

dengan A merupakan nilai absorpsi (%), m_1 sebagai massa kering (g), m_2 sebagai massa jenuh (g).

Amin dkk. (2019), melakukan penelitian pembuatan geopolimer berbahan dasar material perlit, basalt, metakaolin dan feldspart dengan variasi NaOH 15, 25, 35 dan 45 M. Berdasarkan hasil penelitian didapatkan nilai absorpsi terendah menggunakan campuran material basalt dan metakaolin yaitu sebesar 11,17%. Sedangkan nilai absorpsi tertinggi didapatkan pada campuran material perlit dan metakaolin yaitu sebesar 43,99%.

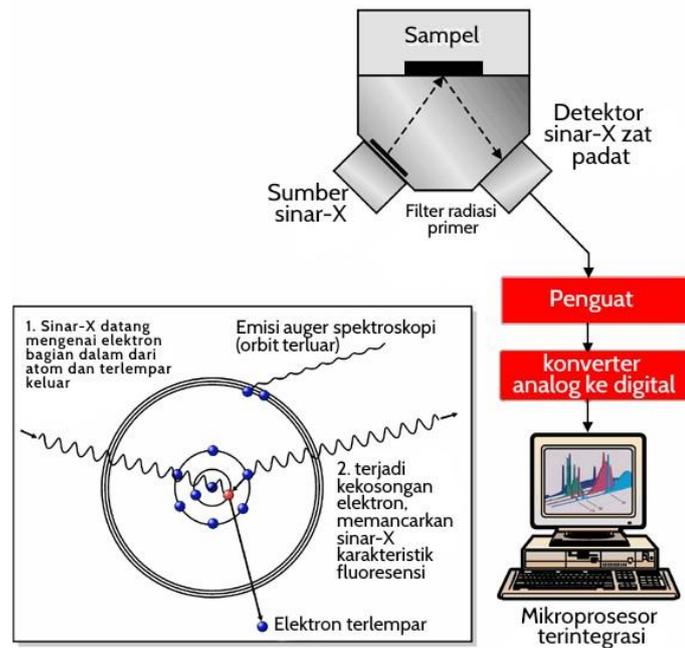
2.5 Karakterisasi Material

Karakterisasi dilakukan untuk mengetahui sifat kimiawi suatu material, adapun pengujiannya sebagai berikut.

2.5.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Spektrometri fluoresensi sinar-X merupakan metode untuk mengidentifikasi suatu unsur dengan mengukur panjang gelombang atau energi sinar-X karakteristiknya. Metode ini memungkinkan material tertentu untuk diukur dengan cara mengukur intensitas garis emisi karakteristik dan kemudian menghubungkan intensitas dengan konsentrasi material (Jenkins, 1999). Metode ini sangat sederhana, paling akurat dan sangat ekonomis untuk penentuan komposisi kimia dari berbagai bahan, non-destruktif, tidak memerlukan atau sangat sedikit preparasi sampel, dan cocok untuk sampel padat, cair, dan bubuk. Metode ini dapat digunakan untuk penentuan berbagai unsur dari kalium (19) sampai uranium (92), dan memberi batas deteksi tingkat ppm, tetapi dapat mengukur konsentrasi hingga 100% lebih mudah dan secara bersamaan (John *et al.*, 2001).

Prinsip dasar dari XRF spectroscopy adalah sinar-X akan mengeluarkan elektron yang terdapat pada kulit bagian paling dalam (misalnya kulit K) dalam suatu atom, dan menyebabkan kekosongan elektron pada bagian ini, sehingga elektron pada kulit yang lebih luar (misalnya kulit L, M, N) akan mengisi kekosongan elektron pada kulit bagian dalam yang menyebabkan pelepasan energi berupa energi foton atau memancarkan sinar X (Girard, 2010). Adapun prinsip kerja XRF dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Prinsip kerja alat XRF (Kalnicky, 2001).

Terlihat pada diatas apabila sumber eksitasi (tabung sinar-X, radioisotop dan lain-lain) digunakan untuk menyinari sampel dalam proses pemedaran. Kemudian fluoresensi sinar-X karakteristik dideteksi dan dianalisis. Seluruh proses dihubungkan dengan komputer yang menyediakan kontrol instrumen umum, pembuatan data, dan pengolahan. Beberapa teknik yang berbeda dapat digunakan untuk menginduksi fluoresensi dalam sampel dan mendeteksi atau menganalisis sinar-X karakteristik yang dilepaskan oleh sampel (Kalnicky, 2001).

Ferdana (2015) melakukan penelitian geopolimer berbahan dasar metakaolin dan lumpur sidoarjo dengan menunjukkan hasil analisis XRF geopolimer dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.1 Hasil Karakterisasi XRF Geopolimer Berbahan Dasar Metakaolin dan Lumpur Sidoarjo (Ferdana, 2015).

Senyawa Oksida	Rumus Kimia	Konsentrasi (%)
Silika	SiO ₂	55,12
Aluminium Oksida	Al ₂ O ₃	22,17
Besi Oksida	Fe ₂ O ₃	7,32
Natrium Oksida	Na ₂ O	2,87
Magnesium Oksida	MgO	3,08
Kalium Oksida	K ₂ O	1,59
Kalsium Oksida	CaO	3,35
Titanium Dioksida	TiO ₂	0,72
Mangan Oksida	MnO ₂	0,16

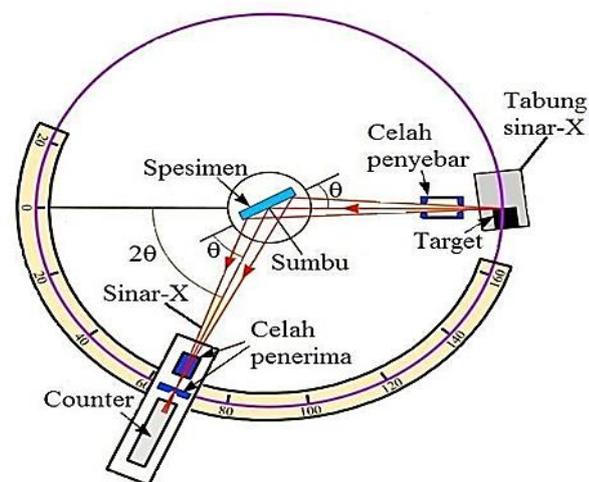
Berdasarkan hasil XRF geopolimer pada **Tabel 2.1** menunjukkan bahwa unsur paling dominan pada sampel yaitu SiO₂ sebesar 55,12%, Al₂O₃ sebesar 22,17% dan Fe₂O₃ sebesar 7,32%. Hal tersebut terjadi karena metakaolin dan lumpur Sidoarjo yang digunakan sebagai bahan baku memiliki kandungan Si dan Al yang cukup tinggi. Si dan Al memainkan peran kunci dalam ikatan polimerisasi. Unsur Al dan Si dalam bahan geopolimer bereaksi dengan NaOH, membentuk hubungan polimer yang kuat.

2.5.2 X-Ray Diffraction (XRD)

XRD adalah alat karakterisasi yang digunakan untuk mengetahui senyawa kristal yang terbentuk. Teknik XRD dapat digunakan untuk menganalisis struktur kristal karena setiap unsur atau senyawa memiliki pola tertentu. Apabila dalam analisis ini pola difraksi unsur diketahui, maka unsur tersebut dapat ditentukan. Metode difraksi sinar-X merupakan metode analisis kualitatif yang sangat penting karena kristalinitas dari material pola difraksi serbuk yang karakteristik, oleh karena itu metode ini disebut juga metode sidik jari serbuk (*powder fingerprint method*).

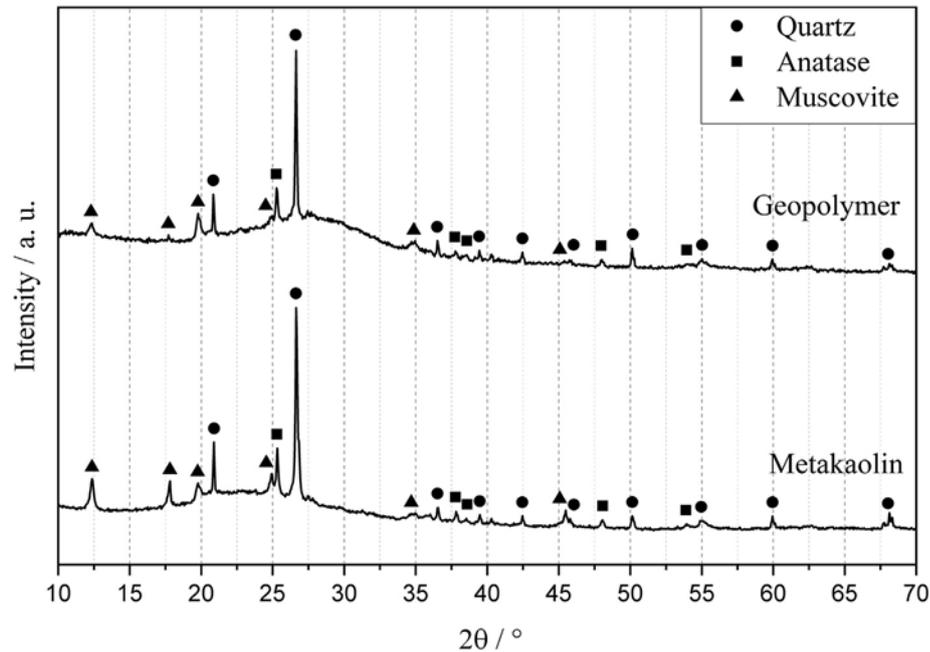
Penyebab utama yang menghasilkan bentuk pola-pola difraksi serbuk tersebut, yaitu ukuran dan bentuk dari setiap selnya serta nomor atom dan posisi atom-atom di dalam sel (Smallman, 2000).

Prinsip kerja XRD adalah ketika berkas sinar-X berinteraksi dengan suatu material, maka sebagian berkas akan diabsorpsi, ditransmisikan, dan sebagian lainnya akan dihamburkan terdifraksi. Berkas yang terdifraksi ini yang dideteksi oleh XRD. Berkas yang dihamburkan tersebut ada yang saling menghilangkan karena fasanya berbeda dan ada yang saling menguatkan karena fasanya sama. Berkas sinar-X yang saling menguatkan inilah yang disebut sebagai berkas difraksi. Adapun skema difraksi sinar-X dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Skema difraksi sinar-X (Cullity, 1978).

Franchin *et al.* (2020), melakukan penelitian geopolimer menggunakan material metakaolin sebagai bahan dasarnya. Sampel geopolimer dikarakterisasi menggunakan XRD untuk mengidentifikasi pengotor dan menentukan terjadinya reaksi seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.4**.



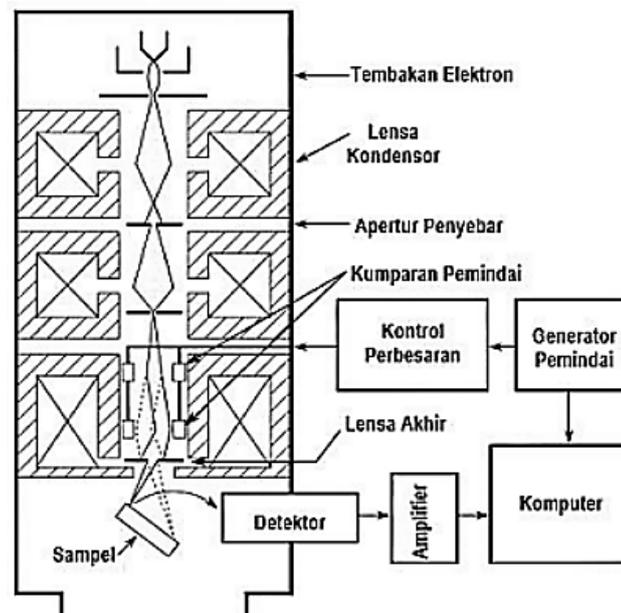
Gambar 2.4 Analisis XRD geopolimer dibandingkan dengan bahan baku metakaolin (Franchin *et al.*, 2020).

Berdasarkan **Gambar 2.4** menunjukkan bahwa geopolimer dan bahan baku metakaolin mengandung kuarsa (SiO_2) dan anatase (TiO_2). Terdapat juga pengotor muskovit ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$). Metakaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) sendiri merupakan amorf, dimana puncak terbentuk pada sudut $20\text{-}25^\circ$. Setelah terjadinya reaksi, puncak amorf maksimum bergeser ke sekitar sudut $25\text{-}30^\circ$, yang menunjukkan bahwa terjadi perubahan struktur kimia. Selama proses geopolimerisasi tidak menunjukkan fase kristal (struktur tipe zeolit).

2.5.3 Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive Spectroscopy (SEM-EDS)

SEM merupakan instrumen yang menghasilkan perbesaran gambar untuk mengungkapkan informasi skala mikroskopis pada ukuran, bentuk, komposisi, kristalografi, sifat fisik dan kimia suatu spesimen (Goldstein *et al.*, 2018). SEM adalah jenis mikroskop elektron yang mencitrakan permukaan sampel oleh

pemindaian dengan pancaran tinggi elektron. Elektron ini memberikan informasi topografi, morfologi, komposisi, orientasi butir dan informasi kristalogafi dari suatu bahan. Morfologi menunjukkan bentuk dan ukurannya, sementara topografi menunjukkan fitur permukaan dari suatu objek, teksturnya, kehalusannya atau kekasarannya. Demikian juga, komposisi berarti unsur dan senyawa yang membentuk bahan sedangkan kristalogafi berarti susunan atom dalam sampel (Goldstein *et al.*, 1992).



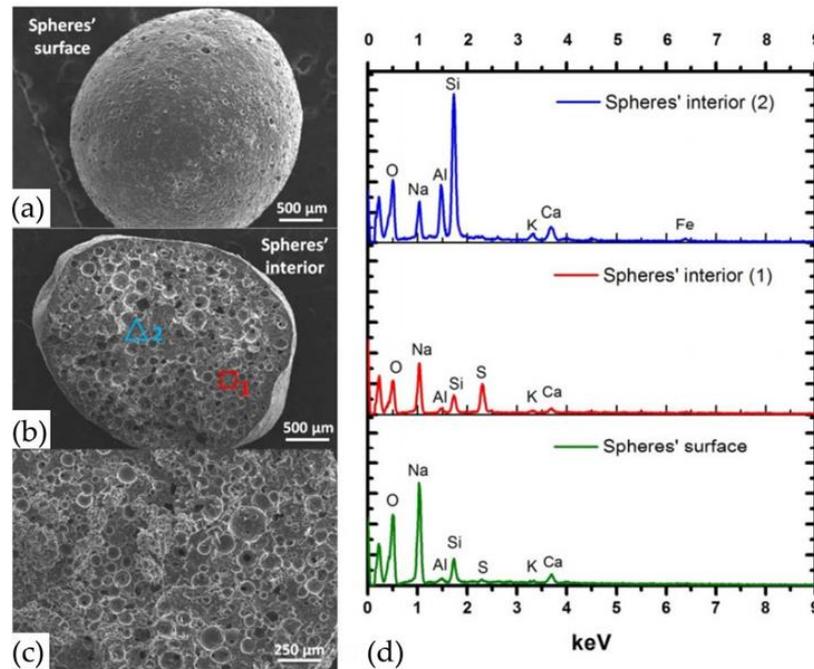
Gambar 2.5 Skema Kerja SEM (Goldstein *et al.*, 2007).

SEM biasanya dilengkapi dengan EDS untuk menangkap X-Ray yang dipantulkan oleh elektron. EDS merupakan suatu sistem peralatan dan software tambahan yang dipasangkan pada suatu mikroskop elektron. EDS dapat digunakan untuk menganalisis semi kuantitatif unsur-unsur dari material. Wilayah sampel yang dianalisis dengan SEM dapat diidentifikasi elemen spesifiknya menggunakan EDS. Sinar-X yang dipancarkan dari permukaan sampel, dideteksi untuk

memberikan data tentang komposisi kimiawi sampel. Analisis SEM-EDS bagus untuk menentukan ukuran partikel dan komposisi dasar.

SEM-EDS juga dapat digunakan untuk mempelajari sifat-sifat permukaan suatu objek, yang di dalamnya dapat menimbulkan kekosongan. Kekosongan ini menghasilkan keadaan atom yang tidak stabil. Apabila atom kembali pada keadaan stabil, elektron dari kulit luar pindah ke kulit yang lebih dalam. Proses ini menghasilkan energi X-Ray tertentu dan menghasilkan perbedaan antara dua energi ikatan pada kulit tersebut. Emisi X-Ray dihasilkan dari proses yang disebut XRF. Pada umumnya kulit K dan L terlibat pada deteksi XRF. Sehingga sering terdapat istilah $K\alpha$ dan $K\beta$ serta $L\alpha$ dan $L\beta$ pada XRF. Jenis spektrum X-Ray dari sampel yang diradiasi akan menggambarkan puncak-puncak pada intensitas yang berbeda (Viklund, 2008).

Jinyun Xu *et al.* (2022), melakukan penelitian geopolimer berpori berbahan dasar metakaolin dan *fly ash* untuk aplikasi adsorpsi metilen biru di dalam air limbah. Sampel geopolimer dilakukan uji karakterisasi SEM-EDS seperti ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.

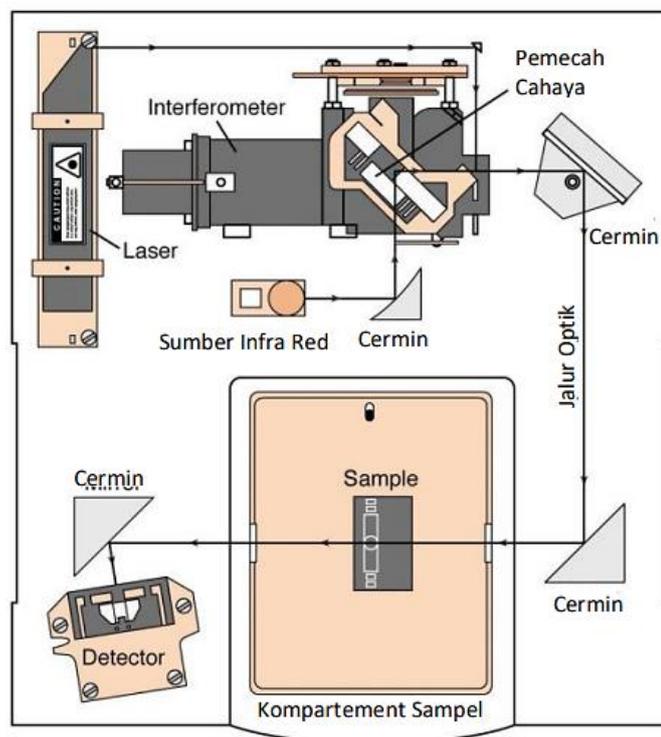


Gambar 2.6 Morfologi sampel geopolimer K1.60° (a) Permukaan 500 μm ; (b dan c) Interior 500 μm ; dan (d) Spektrum EDS (Jinyun Xu *et al.*, 2022).

Berdasarkan **Gambar 2.6** menunjukkan gambar permukaan geopolimer yang memiliki kepadatan permukaan yang disebabkan oleh pembentukan gel Si-O-Si dan gel Si-O-Al. Kepadatan ini terbentuk dari banyaknya gel yang terjadi selama reaksi yang terbentuk. Kandungan Si dan Al yang tinggi berkontribusi terhadap kenaikan gel yang sudah tentu akan menaikkan kuat tekan pasta geopolimer yang terjadi. Pada bagian dalam geopolimer memiliki jumlah pori-pori banyak yang dapat meningkatkan absorpsi. Dalam penelitian tersebut, penyerapan metilen biru di dalam air limbah oleh geopolimer mencapai 79,7 mg/g dengan persentase mencapai 83% penyerapan. Selain itu berdasarkan analisis EDS terdapat perbedaan unsur kimia antara dua bagian bola geopolimer, yang disebabkan oleh ketidakhomogenan partikel dan perbedaan kimia prekursor.

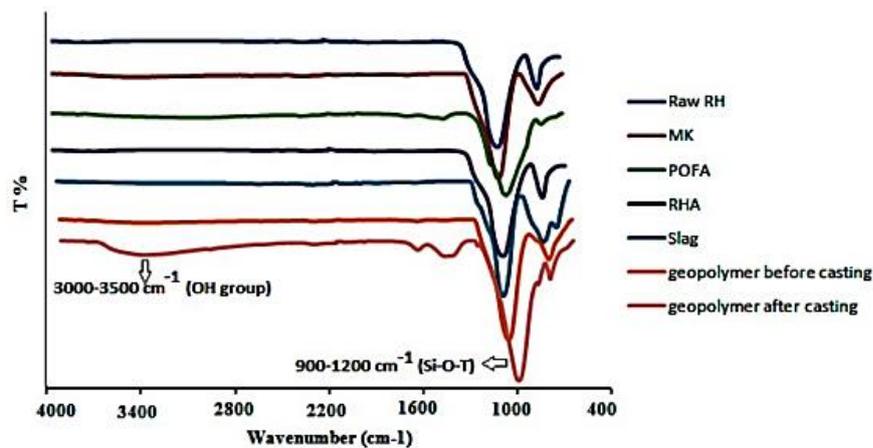
2.5.4 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)*

FTIR merupakan metode pengukuran yang digunakan untuk mengumpulkan spektrum infra merah yang berguna dalam menganalisis kualitatif (identifikasi) dari senyawa organik karena spektrum yang unik hasil dari setiap zat organik dengan puncak structural sesuai dengan fitur yang berbeda. Selain itu, detiap kelompok fungsional menyerap sinar infra merah pada frekuensi tertentu. Sinar infra merah termodulasi saat melewati sampel yang diserap pada panjang gelombang berbeda-beda oleh berbagai molekul dalam sampel, intensitas sinar infra merah akan terdeteksi oleh detektor. Kemudian sinyal dideteksi dan diubah oleh perangkat computer untuk mendapatkan spektrum IR dari sampel (Silverstein, 2002).



Gambar 2.7 Skema FTIR (Harley dan Wiberley, 1954).

Dasar pengukuran spektroskopi infra merah adalah ketika suatu ikatan kimia dapat bervibrasi sesuai dengan level energinya masing-masing sehingga akan menghasilkan frekuensi yang spesifik. Vibrasi molekul memiliki berbagai jenis yang biasanya terdiri dari enam macam antara lain *symmetrical*, *stretching*, *asymmetrical stretching*, *scissoring*, *rocking*, *wagging*, dan *twisting*. Daerah infra merah terdiri atas tiga sub daerah yaitu infra merah dekat ($14000\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$) adalah daerah yang peka terhadap vibrasi *overtone*, infra merah sedang ($4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$) adalah daerah ini berkaitan terhadap transisi energi vibrasi dari molekul yang memberikan informasi mengenai gugus fungsi yang terbentuk dalam molekul, infra merah jauh ($400\text{-}10\text{ cm}^{-1}$) adalah daerah yang memiliki kandungan atom-atom berat seperti senyawa anorganik (Li-Chan *et al.*, 2010).



Gambar 2.8 Spektrum FTIR bahan baku dan geopolimer (Emdadi *et al.*, 2017).

Pada Gambar 2.8 menunjukkan spektrum IR bahan baku dan sampel geopolimer 16 sebelum dan sesudah pengecoran. Menurut Davidovits (2008), jaringan geopolimer berbasis silika-aluminat terdiri dari tetrahedral SiO_4 dan AlO_4 dihubungkan secara bergantian melalui pembagian oksigen. Pita utama geopolimer jatuh dalam wilayah $900\text{-}1200\text{ cm}^{-1}$, sesuai dengan hubungan Si-OT (dimana T adalah Al atau Si). Itu serapan pada 996 dan 797 cm^{-1} ditetapkan pada

Al (IV)-OH (terkoordinasi 6 kali lipat) dan Al (IV)-O (6 kali lipat terkoordinasi) masing-masing. Pada gambar tersebut, puncak IR geopolimer sebelum pengecoran muncul dalam 1052 cm^{-1} bukannya 996 cm^{-1} . Artinya terjadi pembengkokan ikatan O-Si-O yang asimetris dan O-Al-O berada pada frekuensi yang lebih rendah, hal ini sesuai dengan Alonso *et al.* (2001). Yang luas pita pada $3000\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ dan $1650\text{-}1655\text{ cm}^{-1}$, yang terlihat jelas pada sampel geopolimer setelah pengecoran, disebabkan oleh getaran regangan dan deformasi gugus OH dan HOH molekul air. Pita pada $\sim 1400\text{ cm}^{-1}$ ditetapkan untuk peregangan Si-O-Si, sedangkan pita di sekelilingnya $1000\text{-}1070\text{ cm}^{-1}$ dan $750\text{-}790\text{ cm}^{-1}$ pada bahan mentah dikaitkan dengan getaran regangan O-Si-O (Emdadi *et al.*, 2017).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian tugas akhir dilakukan pada bulan Juni sampai Agustus 2023 di Laboratorium Non-Logam, Pusat Riset Teknologi dan Pertambangan BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat

Alat yang digunakan pada penelitian ini diantaranya *ball milling*, timbangan digital, ayakan 200 mesh dan 325 mesh, gelas *beaker*, gelas ukur, aluminium *foil*, oven, cetakan pipa ½ inchi ($D_{\text{dalam}} = 22 \text{ mm}$), baskom, spatula, tumbukan besi, mortar, alat karakterisasi XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR.

3.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan pada penelitian ini diantaranya limbah bata api bekas, mineral basalt, natrium hidroksida (NaOH) Merck dari Jerman dengan kemurnian 99%, natrium silikat (Na_2SiO_3), dan aquades.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur pada penelitian ini terdiri dari preparasi bahan baku, pembuatan geopolimer dan pengujian sampel.

3.3.1 Preparasi Bahan Baku

Preparasi bahan baku dilakukan dengan memecahkan limbah bata api bekas, untuk dimasukkan ke dalam *ball milling*. Selanjutnya *ball mill* limbah batu bata api selama 5 jam hingga mendapatkan bentuk serbuk. Preparasi bahan batu basalt dilakukan dengan mencuci batu basalt menggunakan aquades hingga bersih, kemudian dikeringkan pada suhu ruang. Batu basalt dihaluskan menggunakan *ball milling* selama 5 jam hingga menghasilkan serbuk. Hasil *ball milling* diayak menggunakan ayakan 200 mesh hingga mendapatkan serbuk halus.

3.3.2 Pembuatan Geopolimer

Proses pembuatan sampel geopolimer terdiri dari beberapa tahapan, yaitu preparasi larutan NaOH 10 M, preparasi larutan alkali aktivator dan pembuatan sampel geopolimer.

1. Preparasi Larutan NaOH 10 M

Preparasi larutan NaOH dilakukan dengan melarutkan NaOH berbentuk serpihan dan mencampurkan aquades untuk mencapai konsentrasi 10 M sebanyak 1000 ml, lalu diamkan dalam suhu ruang. Berikut merupakan langkah-langkah membuat larutan NaOH 10 M:

- a. Menghitung kebutuhan NaOH yang akan digunakan dengan persamaan Molaritas:

$$M = \frac{g}{Mr} \times \frac{1000}{V} \quad (3.1)$$

- b. Menimbang NaOH sebesar 400 gram.
- c. Memasukkan NaOH ke dalam gelas *beaker* dengan kapasitas 1000 ml.
- d. Menambahkan aquades sampai batas volume 1000 ml.

e. Mengaduk hingga menjadi larutan yang homogen.

2. Preparasi Larutan Alkali Aktivator

Preparasi larutan alkali dilakukan dengan mencampurkan larutan NaOH 10 M dan larutan Na₂SiO₃ dengan perbandingan 1 : 1 ke dalam wadah, lalu diaduk sampai homogen. Tutup dengan aluminium *foil* agar tidak terkontaminasi bahan lain, dan diamkan selama 24 jam. Adapun komposisi bahan geopolimer ditunjukkan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Komposisi Bahan Geopolimer.

Variasi Komposisi	Batu Bata Api		Batu Basalt		Larutan Alkali (ml)
	(%)	(g)	(%)	(g)	
K1	70	105	30	45	110
K2	80	120	20	30	110
K3	90	135	10	15	110

3. Pembuatan Sampel Geopolimer

Tahapan pembuatan sampel geopolimer sebagai berikut:

- a. Menimbang limbah bata api bekas dan batu basalt sesuai dengan variasi komposisi yang telah ditentukan seperti pada **Tabel 3.1**.
- b. Mengukur larutan alkali aktivator sesuai komposisi yang telah ditentukan pada **Tabel 3.1**.
- c. Memasukkan limbah bata api bekas dan batu basalt ke dalam wadah, lalu menambahkan larutan alkali sedikit demi sedikit sambil diaduk sampai terbentuk adonan yang homogen.
- d. Mencetak adonan geopolimer dengan cetakan pipa ½ inchi.
- e. Mengeringkan adonan geopolimer selama 7 hari pada suhu ruang.
- f. Melepas geopolimer dari cetakan dan diamkan sebentar pada suhu ruang.

- g. Mengeringkan menggunakan oven pada suhu 60, 110, 160 dan 210 °C selama 5 jam.

3.4 Pengujian Sampel

Pengujian sampel geopolimer terdiri dari uji fisis seperti massa jenis, porositas dan absorpsi, dan uji karakterisasi XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR.

3.4.1 Uji Fisis (Massa Jenis, Porositas dan Absorpsi)

Adapun prosedur pengujian sifat fisis geopolimer sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel geopolimer yang telah dikeringkan.
2. Menimbang sampel geopolimer untuk mendapatkan massa kering (m_1).
3. Merendam sampel geopolimer dalam air selama 24 jam.
4. Menimbang sampel yang telah direndam untuk mendapatkan massa jenuh (m_2).
5. Menimbang dalam air sampel yang telah direndam untuk mendapatkan massa jenuh dalam air (m_3).
6. Menghitung besar massa jenis sampel geopolimer dengan persamaan (2.1).
7. Menghitung besar nilai porositas dengan persamaan (2.2).
8. Menghitung besar nilai absorpsi dengan persamaan (2.3).

3.4.2 Karakterisasi XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR

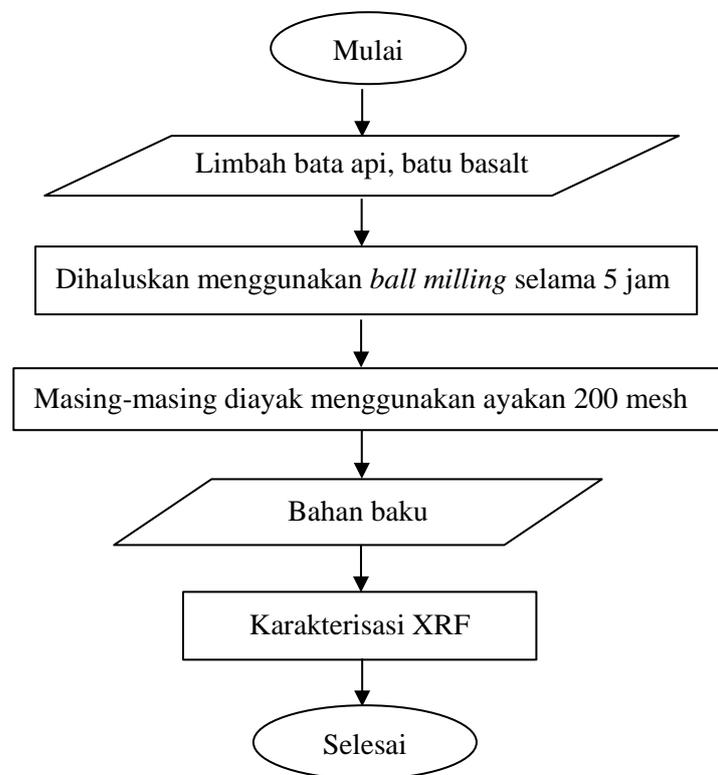
Tahapan pengujian XRF, XRD, SEM-EDS dan FTIR geopolimer sebagai berikut:

1. Menghancurkan sampel geopolimer menggunakan tumbukan besi dan menghaluskannya menggunakan mortar.

2. Mengayak sampel geopolimer yang telah halus menggunakan ayakan 325 mesh sebanyak 10 gram.
3. Sampel yang telah halus ukuran lolos 325 mesh dikarakterisasi.

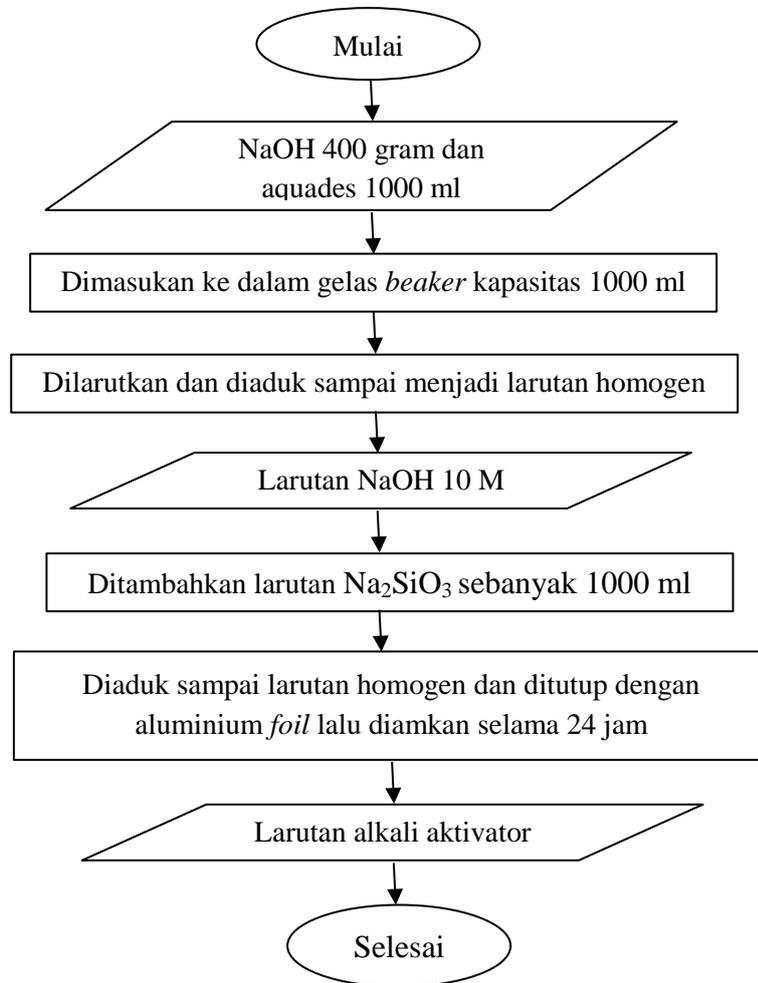
3.5 Diagram Alir

Berikut merupakan diagram alir proses preparasi bahan baku geopolimer yang ditunjukkan pada **Gambar 3.1**.



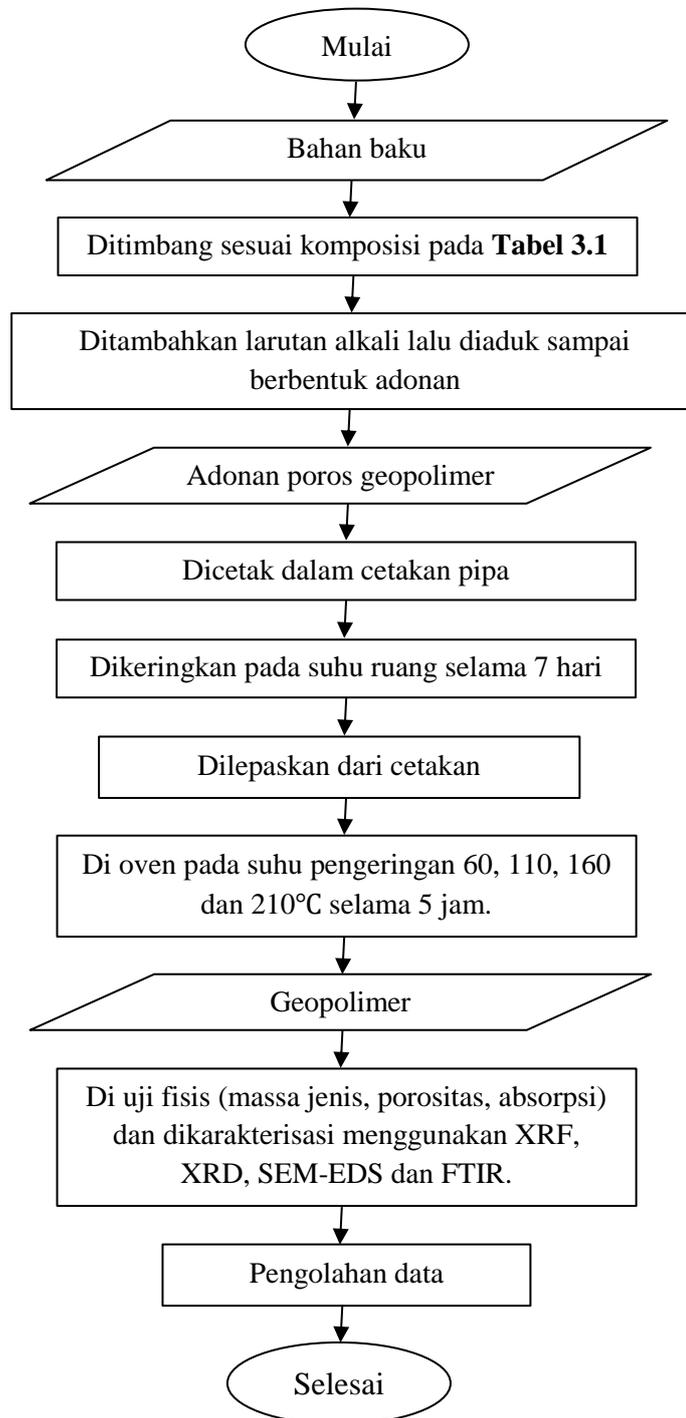
Gambar 3.1 Preparasi bahan baku.

Berikut merupakan diagram alir preparasi larutan alkali aktivator yang ditunjukkan pada **Gambar 3.2**.



Gambar 3.2 Pembuatan larutan alkali aktivator.

Berikut merupakan diagram alir pembuatan sampel geopolimer yang ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



Gambar 3.3 Pembuatan geopolimer.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Limbah bata api dapat digunakan sebagai bahan pembuatan geopolimer karena memiliki kandungan senyawa SiO_2 sebesar 75,192%. Agar memenuhi karakteristik bahan geopolimer limbah bata api ditambahkan serbuk basalt yang kaya akan kandungan silika alumina sebesar 67,238%.
2. Berdasarkan uji fisis yang telah dilakukan, nilai porositas dan absorpsi geopolimer yang paling tinggi didapatkan pada sampel K1 dengan suhu pemanasan 160°C selama 5 jam yaitu berturut-turut sebesar 50,515% dan 47,305% dengan nilai massa jenis sebesar $0,655 \text{ g/cm}^3$. Basalt digunakan sebagai tambahan bahan yang lebih reaktif dan sebagai bahan pembentuk pori-pori.
3. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan fasa yang terbentuk pada sampel geopolimer yaitu *Quartz*, *Cristobalite*, *Orthoclase*, *Siderit*, *Labradorite* dan *Ferrosilite*.

4. Hasil karakterisasi SEM-EDS menunjukkan gambaran pori-pori dan retakan internal yang tersegmentasi di seluruh sampel geopolimer, dengan penyebaran unsur Si yang paling dominan.
5. Hasil karakterisasi FTIR menunjukkan gugus fungsi yang terbentuk pada geopolimer yaitu Si-O dan Si-O-Al.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian, saran yang diberikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

Penelitian selanjutnya sebaiknya menetapkan proporsi pereaksi alkali dan penambahan variasi komposisi bahan yang optimal agar tercapai kinerja material yang maksimal. Selain itu suhu yang digunakan pada proses pemanasan geopolimer sebaiknya menggunakan suhu tinggi agar mendapatkan geopolimer dengan persentase porositas yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M. dan Suharto. 2017. Pembuatan Semen Geopolimer Ramah Lingkungan Berbahan Baku Mineral Basalt Guna Menuju Lampung Sejahtera. *Jurnal Kelitbangan*, Vol 05 (01) : 30-45.
- Amin, M., Birawidha, D.C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y. dan Septiana, R. 2019. Pengaruh Pemakaian Sodium Hidroksida (NaOH) pada Pembuatan Geopolimer Menggunakan Material Perlit, Basalt dan Feldspart. *Jurnal Balitbang Lampung*, Vol 7 (1) : 97-115.
- ASTM C 642-97. 1997. *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Annual Book of ASTM Standards.
- Bai, C. dan Colombo, P. 2018. Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: a review. *Ceramics International*, hal 1-52.
- Birawidha, D.C., Isnugroho, K., Hendronursito, Y., Amin, M. dan Al Muttaqi, M. 2019. The X-Ray Diffraction (XRD) Analysis of Basalt from Mataram Baru Via Slow and Rapid Cooling Process. *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, Vol 13 (2) : 86-94.
- Chirikure, S., Heimann, R. B. and Killick, D. 2010. The technology of tin smelting in the Rooiberg Valley, Limpopo Province, South Africa, ca. 1650-1850 CE. *Journal of Archaeological Science*, Vol 37 (7) : 1656–1669.
- Cullity, B.D. 1978. *Elements of X-ray Diffraction*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. New Jersey, USA.
- Davidovits, J. 1994. *High-alkali cements for 21st century concretes*. Special Publication, Vol 144 : 383-398.

- Davidovits, J. 1994. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, Vol 6 (2) : 263-278.
- Davidovits, J. 1994. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. *Properties of Geopolymer Cements*. Kiev: Kiev State Technical University.
- Emdadi, Z., Asim, N., Amin, M. H., Yarmo, M. A., Maleki, A., Azizi, M. dan Sopian, K. 2017. Pengembangan Penggunaan Geopolimer Hijau Berbahan Limbah Pertanian dan Industri dengan Daya Serap Air Tinggi. *Jurnal Ilmu Terapan: Aplikasi Sains*, Vol 7 (1) : 1-15.
- Fairus, S., Haryono, H., Sugita, M. H. dan Sudrajat, A. 2018. Proses pembuatan waterglass dari pasir silika dengan pelebur natrium hidroksida. *Jurnal Teknik Kimia Indonesia*, Vol 8 (2) : 56-62.
- Fauzi, A., Putri, Y. H., Syukri, Iskandar, Mahyar, H. dan Putra, I. 2022. Analisa Studi Pasta Geopolimer dengan Menggunakan Fly Ash PLTU Pangkalan Susu untuk Mengatasi Retak pada Beton. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, Vol 6 (1) : 101-106.
- Ferdana, Y. S. 2015. *Analisa Kuat Tekan Pasta Geopolimer Berbahan Dasar Kaolin dan Lumpur Sidoarjo*. Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.
- Franchin, G., Pesonan, J., Luukkonen, T., Bai, C., Scanferla, P., Botti, R., Carturan, S., Innocentini, M., dan Kolombo, P. 2020. Removal of ammonium from wastewater with geopolymer sorbents fabricated via additive manufacturing. *Material and Design*, Vol 195 (1) : 1-10.
- Gartner, E., 2014. Industrially interesting approaches to 'Low-CO₂' cement. *Cem. Concr. Res.* 34 (9) : 1489-1498
- Ghelleri, R., Silva, L. L., Fiori, M. A. dan Batiston, E. R. 2022. Exploratory study for the alkaline activation of basalt powder as a supplementary cementitious matrix. *IBRACON Structures and Materials Journal*, Vol 15 (4) : 1-12.

- Giannopoulou, I., Robert, P. M., Sakkas, K. M., Petrou, M. F. dan Nicolaides, D. 2023. High temperature performance of geopolymers based on construction and demolition waste. *Journal of Building Engineering*, Vol 72 (1) : 2-14.
- Girard, J. E. 2010. Principles of Environmental Chemistry. Jones and Bartlett Publishers. Burlington. USA.
- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Echlin, P. dan Joy, D. C. 1992. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Micro Analysis*. Plenum Press. New York.
- Goldstein, J.I., Newbury, D.E., Michael, J.R., Ritchie, N.W.M., Scott, J.H.J. dan Joy, D.C. 2018. *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis Fourth Edition*. Springer Science+Business Media LLC. USA.
- Gourley, J.T. and Johnson, G.B., “Developments in Geopolymer Precast Concrete”, Proceedings of the International Workshop on Geopolymers and Geopolymer Concrete, Perth, Australia, 2005
- Hamidi, R. M., Man, Z. dan Azizli, K. A. 2016. Concentration of NaOH and the effect on the properties of fly ash based geopolymer. *Procedia engineering*, Vol 148 (2) : 189-193.
- Isnugroho, K., Hendronursito, Y dan Birawidha, D.C. 2018. Characterization and Utilization Potential of Basalt Rock from East-Lampung District. *Materials Science and Engineering*, Hal. 0-5.
- Jenkins, R. 1999. *X-Ray Fluorescence Spectrometry*. Second Edition. John wiley and Sons, Inc. New York. Hal. 75-85.
- John, A., Alexanda, S. and Larry, A. 2001. Approaching a universal sample Preparation method for XRF analysis of powder materials. International Center for Diffraction Data 2001. *Advances in X – Ray Analysis*. Vol 44 (1) : 368- 370.
- Kalnicky, D.J. dan Singhvi, R. 2001. Field portable XRF analysis of enviromental samples. *Journal of Hazardous Materials*. Vol 83 (1) : 93-122.

- Kumar, S., Gautam, P. D. dan Kumar, B. S. 2019. Effect of Alkali Activator Ratio on Mechanical Properties of GGBS based Geopolymer Concrete. *IJITEE*, Vol 8 : 947-952. <https://doi.org/10.35940/ijtee.J9539.1081219>
- Laoli, M. E., Kaseke, O. H., Manoppo, M. R. E. dan Jansen, F. 2013. Kajian Penyebab Perbedaan Nilai Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal Panas yang Dihitung Berdasarkan Metode Marshall dengan yang Dicari Langsung Berdasarkan Aastho T209. *Jurnal Sipil Statistik*. Vol 1 (2) : 128-132.
- Li, Z., Ding, Z. dan Zhang, Y. 2004. Development of Sustainable Cementitious Materials. *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Vol 1 (2) : 55-76.
- Olvianas, M., Widiyatmoko, A. dan Petrus, H. T. B. M. 2017. IR spectral similarity studies of geothermal silica-bentonite based geopolymer. *In AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC. Vol 1887 (1), pp. 020015).
- Saraya, M. E. I. 2017. Preliminary Study of Alkali Activation of Basalt: Effect of NaOH Concentration on Geopolymerization of Basalt. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Vol 5 (1) : 58-76.
- Sengkey, S. L., Irmawaty, R., Hustim, M. dan Purwanto, P. 2020. Pengaruh Alkali Aktivator terhadap Workabilitas dan Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash Klas C. *Seminar Nasional Teknik Sipil X 2020*, 101-108.
- Sidik, U. 2012. *Sintesis Metakaolin dan Abu Terbang Sebagai Prekursor Geopolimer*. Skripsi S.T., Universitas Indonesia, Depok.
- Smallman, R.E. dan Bishop, R. J. 2000. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Erlangga. Jakarta.
- SNI 03-1969 (1990). *Metode Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Badan Standarisasi Nasional.
- SNI 03-6433. (2000). *Metode Pengujian Kerapatan, Penyerapan dan Rongga dalam Beton yang telah Mengeras*. Badan Standarisasi Nasional.

- Sutapa, A. A. G. 2011. Porositas, Kuat Tekan dan Kuat Tarik Belah Beton dengan Agregat Kasar Batu Pecah Pasca Dibakar, Vol 15 (1) : 50-57.
- Triwulan., Ekaputri, J. J dan Adiningtyas, T. 2013. Analisa Sifat Mekanik Beton Geopolimer Berbahan Dasar Fly-Ash dan Lumpur Porong Kering Sebagai Pengisi. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sipil*, Vol 3 (1) : 13-21.
- Venyite, P., Makone, E.C., Kaze, R.C., Nana, A., Nemaleu, J.G.D., Kamseu, E., Melo, U.C dan Leonelli, C. 2021. Effect of Combined Metakaolin and Basalt Powder Additions to Laterite-Based Geopolymers Activated by Rice Husk Ash (RHA) /NaOH Solution. Hal. 1-20.
- Viklund, A. 2008. Teknik Pemeriksaan Material Menggunakan XRF, XRD, dan SEM-EDS. ITB. Bandung.
- Yuliansyah, F. dan Sujatmiko, C. 2019. Analisis Variasi Ukuran Agregat Batu Basalt Scoria Terhadap Hasil Uji Kuat Tekan Beton Mutu K-250. *Jurnal Teknik Sains*. Vol 4 (2) : 1-10.
- Zhang, M., El-Korchi, T., Zhang, G., Liang, J. dan Tao, M., 2014. Synthesis factors affecting mechanical properties, microstructure, and chemical composition of red mud–fly ash based geopolymers. Vol 134 (1) : 315–325.