PEMBUATAN GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR LIMBAH BATA TAHAN API DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU UNTUK APLIKASI MATERIAL STRUKTURAL

(Skripsi)

Oleh

Deska Megasari
1917041047

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

ABSTRAK

PEMBUATAN GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR LIMBAH BATA TAHAN API DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU UNTUK APLIKASI MATERIAL STRUKTURAL

Oleh

Deska Megasari

Telah dilakukan pembuatan geopolimer menggunakan bahan dasar dari limbah bata tahan api. Bertujuan untuk mengetahui proses pembuatan geopolimer dari limbah bata tahan api sebagai material pengganti semen, sifat fisis (massa jenis, porositas, absorpsi), karakteristik morfologi, fasa kristal, komposisi unsur dan gugus fungsi. Prosedur yang digunakan pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan, diantaranya yaitu preparasi sampel, pembuatan sampel, pengujian sampel, dan karakterisasi sampel (FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS). Variasi suhu yang digunakan pada penelitian ini yaitu suhu 40, 50, 60 dan 70 ℃ dengan variasi waktu 1-3 jam. Hasil uji fisis pada semua sampel diperoleh hasil terbaik pada suhu 40 ℃ dengan waktu pemanasan selama 1 jam diperoleh nilai porositas sebesar 11,54 % dan absorpsi sebesar 7,25 % dengan massa jenis sebesar 1,58 g/cm^3. Hasil analisis FTIR menunjukkan terbentuknya gugus fungsi Si-O-(Si,Al) pada bilangan gelombang 1011-1012 cm^{-1} dan Al-O-Si pada bilangan gelombang 533-778 cm^{-1}. Hasil analisis XRF menunjukkan Si, Fe, Al dan Ca merupakan unsur yang memiliki kadar tertinggi yang terkandung pada sampel geopolimer. Hasil analisis XRD menunjukkan fasa terbentuk pada sampel yaitu *quartz* (SiO_2), *anorthite* ($Ca_8Si_{16}Al_{16}O_{64}$) *maghenite* ($Fe_{21.33}O_{32}$) dan *ferrosilite* ($Fe_{6.40}Ca_{1.60}Si_8O_{24}$). Kemudian morfologi hasil FESEM-EDS menunjukkan bentuk bongkahan yang membentuk fasa kristal dan terdapat pula material yang tidak bereaksi.

Kata kunci: geopolimer, limbah bata tahan api, semen, silikat, aluminat.

ABSTRACK

MAKING GEOPOLYMER FROM REFRACTORY BRICK WASTE WITH VARIATIONS IN TEMPERATURE AND TIME FOR STRUCTURAL MATERIAL APPLICATIONS

By

Deska Megasari

Geopolymer has been made using basic materials from refractory brick waste. Aims to determine the process of making geopolymer from refractory brick waste as a cement replacement material, physical properties (density, porosity, absorption), morphological characteristics, phase structure, elemental composition and functional groups. The procedure used in this research has several stages, including sample preparation, sample making, sample testing, and sample characterization (FTIR, XRF, XRD and FESEM-EDS). The temperature variations used in this research were temperatures of 40, 50, 60 and 70 ℃ with time variations of 1-3 hours. The best results of physical tests on all samples were obtained at a temperature of 40 ℃ with a heating time of 1 hour, resulting in a porosity value of 11.54% and an absorption value of 7.25% with a density of 1.58 g/cm^3. The results of FTIR analysis show the formation of Si-O-(Si,Al) functional groups at wave numbers 1011-1012 cm^{-1} and Al-O-Si at wave numbers 533-778 cm^{-1}. The results of XRF analysis show that Si, Fe, Al and Ca are the elements with the highest levels contained in the geopolymer samples. The results of XRD analysis show that the phases formed in the sample are quartz (SiO_2), anorthite ($Ca_8Si_{16}Al_{16}O_{64}$) maghenite ($Fe_{21.33}O_{32}$) and ferrosilite ($Fe_{6.40}Ca_{1.60}Si_8O_{24}$). Then the morphology of the FESEM-EDS results shows the shape of chunks that form a crystal phase and there is also material that does not react.

Keywords: *geopolymer, refractory brick waste, cement, silicate, aluminate.*

PEMBUATAN GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR LIMBAH BATA TAHAN API DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU UNTUK APLIKASI MATERIAL STRUKTURAL

Oleh

DESKA MEGASARI

SKRIPSI

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Lampung

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024

Judul Skripsi	: **PEMBUATAN GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR LIMBAH BATA TAHAN API DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU UNTUK APLIKASI MATERIAL STRUKTURAL**
Nama Mahasiswa	: Deska Megasari
Nomor Pokok Mahasiswa	: 1917041047
Jurusan	: Fisika
Fakultas	: Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

Prof. Drs. Posman Manurung, M.Si., Ph.D.	**Dr. Sudibyo, S.T., M.Sc.**
NIP. 195903081991031001	NIP. 198200327201502100 2

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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 : **12 Juni 2024**

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam 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 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.

Bandarlampung, 12 Juni 2024

Deska Megasari
NPM. 1917041047

RIWAYAT HIDUP

Penulis bernama Deska Megasari, dilahirkan di Way Petay pada tanggal 30 Desember 2001. Penulis merupakan anak keempat dari pasangan Bapak Ujang Nurhan dan Ibu Ilun Arifah. Penulis menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri (SDN) 02 Way Petay pada tahun 2013, dilanjutkan ke Sekolah Menengah Pertama (SMP) 01 Sumber Jaya pada tahun 2016, dan Sekolah Menengah Atas Negeri (SMAN) 01 Sumber Jaya pada tahun 2019. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung melalui jalur SBMPTN tahun 2019.

Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif mengikuti beberapa organisasi. Pada tahun 2019 penulis menjadi anggota magang bidang komunikasi dan informasi Himpunan Mahasiswa Fisika (HIMAFI). Pada tahun 2020 penulis menjadi anggota bidang kaderisasi Rois FMIPA Unila dan UKM Penelitian Unila. Pada tahun 2021 penulis menjadi Sekretaris Bidang Akademik dan Riset Rois Fmipa Unila. Penulis melaksanakan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di deputi Direktorat Sistem dan Harmonisasi Akreditasi (SHA) di kantor Komite Akreditasi Nasional (KAN) Kota Jakarta Pusat dan Kuliah Kerja Nyata (KKN) Universitas Lampung di Desa Sidomulyo, Kec. Sumberejo, Kab. Tanggamus pada tahun 2022.

MOTTO

"Janganlah kau tuntut Tuhanmu karena tertundanya keinginanmu, tetapi tuntutlah dirimu sendiri karena engkau telah menunda adabmu kepada Allah"

(Ibnu 'Athaillah As-Sakandari)

"Karena sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan, sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan"

(Q.S. Al-Insyirah : 5-6)

"Tidak ada masalah yang bisa kita tampung, tidak ada masalah yang bisa kita selesaikan sendiri dan tidak ada solusi yang sebenarnya kita sendiri cari solusi itu, kita butuh Allah dalam setiap perihal kehidupan kita"

(Penulis)

PERSEMBAHAN

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

Kedua Orang Tuaku tercinta

Terimakasih atas segala pengorbanan, nasihat dan doa baik yang tidak pernah berhenti kalian berikan untukku sehingga bisa menyelesaikan pendidikan S1 ini

Kakak-kakakku tercinta

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 "**PEMBUATAN GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR LIMBAH BATA TAHAN API DENGAN VARIASI SUHU DAN WAKTU UNTUK APLIKASI MATERIAL STRUKTURAL**".

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 ini 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, 12 Juni 2024

Penulis,

Deska Megasari
NPM. 1917041047

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat iman, islam, dan kesehatan sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini. Dengan segala kerendahan dan ketulusan hati, penulis mengucapkan terima kasih kepada banyak pihak yang telah mendukung dan membantu dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Prof. Posman Manurung, M.Si., Ph.D. sebagai Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, saran dan masukan kepada penulis selama penulisan skripsi ini.
2. Bapak Dr. Sudibyo, S.T., M.Sc. dan Bapak Muhammad Amin, S.T. selaku Pembimbing Kedua yang sudah banyak memberikan bimbingan, masukan, arahan serta saran selama penelitian dan kepenulisan skripsi.
3. Ibu Dra. Dwi Asmi, M.Si., Ph.D. sebagai Dosen Penguji yang telah berkenan untuk memberikan kritik dan saran yang membangun kepada penulis.
4. Ibu Humairoh Ratu Ayu, S.Pd., M.Si. sebagai dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberi nasihat dan juga motivasi selama menempuh pendidikan di Jurusan Fisika.

5. Orang tua penulis Bapak Ujang Nurhan dan Ibu Ilun Arifah yang selalu memberikan dukungan dan doa yang tiada henti.
6. Seluruh Dosen Jurusan Fisika atas segala ilmu dan pengalamannya yang telah diberikan selama penulis menjadi mahasiswa di Universitas Lampung, para staff dan karyawan Jurusan Fisika yang telah membantu memenuhi kebutuhan administrasi penulis.
7. Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN Lampung Selatan yang telah memfasilitasi penulis selama proses penelitian berlangsung, para staff admin dan satpam yang telah membantu selama proses kegiatan penelitian.
8. Teman penelitian Linda Herviana yang telah membantu selama proses kegiatan penelitian berlansung dan Fegi Liani yang telah membantu selama proses penyelesaian skripsi ini.
9. Teman-teman "Asrama RQ" Astin Vidyasani, Rahmawati, Lousanja Dira dan Ajeng Pratiwi yang selalu mendukung apapun kondisinya.
10. Teman-teman seperjuangan Fisika 2019 dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah memberikan doa, motivasi, bantuan moril maupun materil kepada penulis.

Semoga Allah SWT. Senantiasa memberikan balasan atas segala kebaikan yang telah dilakukan oleh semua pihak untuk penulis.

Bandar Lampung, 12 Juni 2024
Penulis,

Deska Megasari

DAFTAR ISI

Halaman

ABSTRAK ii

ABSTRACT iii

HALAMAN JUDUL iv

LEMBAR PENGESAHAN v

LEMBAR PERNYATAAN vii

RIWAYAT HIDUP viii

MOTTO ix

PERSEMBAHAN x

KATA PENGANTAR xi

SANWACANA xii

DAFTAR ISI xiv

DAFTAR GAMBAR xvi

DAFTAR TABEL xviii

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 4
1.3 Tujuan Penelitian 5
1.4 Batasan Masalah 5
1.5 Manfaat Penelitian 6

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bata Tahan Api 7
2.2 Geopolimer 9
2.3 Sodium Silikat (Na_2Si_3) 11
2.4 Natrium Hidroksida (NaOH) 13

2.5 Sifat Fisis 14
2.5.1 Massa Jenis 15
2.5.2 Porositas 16
2.5.3 Absorpsi 18
2.6 Karakterisasi Material 19
2.6.1 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) 19
2.6.2 *X-Ray Fluorence* (XRF) 21
2.6.3 *X-Ray Diffraction* (XRD) 24
2.6.4 *Field Emission Scanning Electron Microscop-Energy Dispersive Spectroscopy* (FESEM/EDS) 27
III. METODE PENELITIAN
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 29
3.2 Alat dan Bahan Penelitian 29
3.2.1 Alat Penelitian 29
3.2.2 Bahan Penelitian 30
3.3 Prosedur Penelitian 30
3.3.1 Preparasi Sampel 30
3.3.2 Pembuatan Sampel 31
3.3.3 Pengujian Sampel 32
3.4 Karakterisasi 33
3.5 Diagram Alir 34
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN
4.1 Hasil Produk Sampel Geopolimer 39
4.2 Hasil Uji Fisis Sampel Geopolimer 40
4.2.1 Hasil Pengujian Massa Jenis Sampel Geopolimer 40
4.2.2 Hasil Pengujian Absorpsi Sampel Geopolimer 41
4.2.3 Hasil Pengujian Porositas Sampel Geopolimer 43
4.3 Hasil Karakterisasi Geopolimer 44
4.3.1 Hasil Karakterisasi FTIR pada Bahan Dasar dan Sampel Geopolimer 44
4.3.2 Hasil Karakterisasi XRF Sampel Geopolimer 46
4.3.3 Hasil Karakterisasi XRD Sampel Geopolimer 49
4.3.4 Hasil Karakterisasi FESEM-EDS Sampel Geopolimer 55
V. KESIMPULAN DAN SARAN
5.1 Kesimpulan 59
5.2 Saran 60
DAFTAR PUSTAKA 61
LAMPIRAN 65

DAFTAR GAMBAR

Halaman

Gambar 2.1 Bata tahan api 7

Gambar 2.2 Reaksi geopolimer 9

Gambar 2.3 Grafik absorpsi geopolimer 19

Gambar 2.4 Spektrum FTIR geopolimer limbah batu bata dan abu layang 20

Gambar 2.5 Skematik XRF 22

Gambar 2.6 Mekanisme fluoresensi sinar-X 23

Gambar 2.7 Difraksi sinar-X pada kisi kristal 26

Gambar 2.8 Pola XRD geopolimer dari limbah batu bata api..... 26

Gambar 2.9 Skema FESEM-EDS 27

Gambar 2.10 Bentuk morfologi SEM 28

Gambar 3.1 Preparasi bahan limbah bata tahan api..... 34

Gambar 3.2 Preparasi larutan alkali 35

Gambar 3.3 Pembuatan sampel geopolimer 36

Gambar 3.4 Pengujian massa jenis, porositas dan absorpsi 37

Gambar 3.5 Karakterisasi FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS 38

Gambar 4.1 Sampel dan serbuk geopolimer (a) suhu 40℃ pemanasan 1 jam, (b) suhu 70℃ pemanasan 3 jam 39

Gambar 4.2 Grafik massa jenis (g/cm^3) sampel geopolimer dengan variasi suhu dan waktu pemanasan 40

Gambar 4.3 Grafik absorpsi (%) sampel geopolimer dengan variasi suhu dan waktu pemanasan 42

Gambar 4.4 Grafik porositas (%) sampel geopolimer dengan variasi suhu dan waktu pemanasan 43

Gambar 4.5 Spektrum FTIR geopolimer dengan variasi suhu dan waktu (A) 70 ℃ (3 jam pemanasan) dan (B) 40 ℃ (1 jam pemanasan) 47

Gambar 4.6 Diaftogram XRD geopolimer dengan variasi suhu dan waktu (A) 70 ℃ (3 jam pemanasan) dan (B) 40 ℃ (1 jam pemanasan) 50

Gambar 4.7 Hasil *refine* XRD dengan variasi (a) suhu 40 ℃ waktu 1 jam pemanasan dan (b) suhu 70 ℃ waktu 3 jam pemanasan..... 53

Gambar 4.8 Pemetaan unsur kimia (EDS) pada sampel geopolimer (a) suhu 40 ℃ pemanasan 1 jam dan (b) suhu 70 ℃ pemanasan 3 jam 56

Gambar 4.9 Hasil FESEM sampel geopolimer (a) suhu 40 ℃ waktu 1 jam pemanasan dan (b) suhu 70 ℃ waktu 3 jam pemanasan 57

DAFTAR TABEL

Halaman

Tabel 2.1 Hasil pengukuran massa jenis mortar geopolimer terhadap suhu 15
Tabel 2.2 Hasil uji porositas mortar geopolimer 17
Tabel 2.3 Hasil analisis XRF geopolimer dari limbah bata 24
Tabel 3.1 Komposisi bahan geopolimer limbah bata api 32
Tabel 4.1 Komposisi oksida yang terkandung dalam limbah bata tahan api 45
Tabel 4.2 Parameter refinement data XDR sampel geopolimer..... 54
Tabel 4.3 Sel parameter sampel geopolimer 55
Tabel 4.4 Komposisi unsur sampel geopolimer pada suhu 40℃ dan 70℃ 57

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Semen menjadi salah satu bahan konstruksi yang sangat penting dalam bidang pembangunan. Kebutuhan akan semen terus meningkat sejalan dengan program percepatan pembangunan infrastruktur terpadu yang dicanangkan oleh pemerintah. Seiring dengan meningkatnya permintaan semen maka semakin meningkat pula tingkat pencemaran lingkungan karena pada proses pembuatan semen terjadi pelepasan gas karbondioksida (CO_2) ke udara. Besarnya CO_2 yang dilepaskan ke udara sebanding dengan jumlah semen yang dihasilkan sehingga dapat merusak lingkungan hidup seperti pemanasan global akibat efek rumah kaca dari hasil kegiatan industri semen (Devi *et al*., 2017).

Untuk mengurangi emisi gas CO_2 akibat pembuatan semen portland dan mengatasi efek buruk yang merusak lingkungan serta dalam upaya memperbaiki masalah durabilitas pada material beton yang menggunakan semen, sudah saatnya perlu dilakukan perubahan akan ketergantungan pada semen portland, maka diperlukan material lainnya sebagai pengganti. Semen geopolimer adalah salah satu semen hasil temuan dan dipopulerkan oleh Josefh Davidovits, teknologi geopolimer lebih ramah

lingkungan karena selain dapat menggunakan bahan-bahan buangan industri, proses pembuatan geopolimer tidak terlalu memerlukan energi, seperti halnya proses pembuatan semen yang setidaknya memerlukan suhu hingga 1400℃ berdasarkan SNI 15-2049-1994. Bahan baku utama yang diperlukan untuk pembuatan semen geopolimer adalah bahan-bahan yang banyak mengandung unsur-unsur silika (SiO_2) dan alumina (Al_2O_3) (Davidovits, 1994). Salah satu material yang banyak mengandung unsur silika dan alumina adalah bata tahan api yang komposisi kimianya SiO_2 = 60−65% dan alumina Al_2O_3 = 14−15% (Pranaka, 2022).

Bata tahan api (*fire brick*) merupakan salah satu kelompok material refraktori yang biasanya digunakan sebagai penahan dan penyimpan panas pada tungku pembakaran atau *furnace*. Bata tahan api adalah jenis bata khusus yang dapat bertahan pada suhu tinggi karena memiliki titik leleh yang tinggi hingga 2552 ℉ (1400 ℃) dan mampu mengisolasi panas (Kanolt, 1917). Bata tahan api yang sering digunakan untuk melapisi tungku pembakaran memiliki masa pakai terbatas, akibat penggunaan terus menerus pada suhu tinggi sehingga secara rutin harus diganti. Maka seiring dengan hal tersebut, jumlah bata tahan api bekas pakai yang dihasilkan dari tungku pembakaran akan terus meningkat sesuai dengan banyaknya proses industri.

Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 101 tahun 2014 Tentang Limbah Bahan Beracun dan Berbahaya (B3), bata isolasi atau bata tahan panas bekas pakai industri adalah termasuk limbah B3 kategori 2. Untuk itu diperlukan upaya penanganan limbah bata tahan api atau bata isolasi ini secara serius baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang. Untuk alasan ini maka perlu dilakukan penelitian mengenai

limbah bata tahan api sebagai bahan baku utama pada pembuatan semen geopolimer agar limbah bata tahan api mempunyai nilai tambah ekonomi lebih baik.

Penelitian sebelumnya tentang pembuatan geopolimer berbasis bata tahan api, yaitu penelitian yang dilakukan oleh (Chindaprasirt *and* Rattanasak, 2018) yang disintesis dari abu terbang kalsium tinggi (*fly ash*) dengan 8M NaOH + Na_2SiO_3. Hasil penelitian yang diperoleh menunjukkan geopolimer memiliki ketahanan terhadap panas hingga suhu 400 ℃. Pembentukan ikatan Al−O−Si yang terjadi menghasilkan kekuatan dan ketahanan panas dari komposit. Penelitian lainnya oleh (Beleuk à Moungam *et al.*, 2017) dengan bahan baku dari limbah batu bata api dicampur abu sekam padi dan rasio larutan alkali 1:1 NaOH sebanyak 8 M. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivator alkalin memiliki potensi yang baik dalam mengkonsolidasikan bubuk limbah batu bata api dan sekam padi melalui proses geopolimerisasi.

Berdasarkan uraian di atas, penelitian ini dilakukan bertujuan untuk memanfaatkan potensi penggunaan kembali limbah industri untuk produksi bahan bangunan berbasis geopolimer yang lebih ramah lingkungan dari limbah bata tahan api. Penelitian ini menggunakan variasi suhu dan waktu pemanasan dengan campuran larutan alkali yaitu NaOH dan Na_2SiO_3 kemudian dicetak berbentuk silinder dengan diameter 1,27 cm dan tinggi 2,5 cm kemudian dikeringkan pada suhu pengeringan 40, 50, 60 dan 70℃ selama 1, 2 dan 3 jam. Pemilihan variasi suhu dan waktu yang dipakai pada penelitian ini didasarkan pada penelitian sebelumnya oleh (Malik, 2016) bahwa nilai uji fisik-mekanik optimal didapat pada suhu 70℃ dan oleh (Irhab, 2022) pada waktu

pemanasan 3 jam memiliki hasil uji fisik-mekanik yang lebih baik. Maka variasi suhu dan waktu pengeringan pada penelitian ini diambil dari rentang suhu 40-70℃ dan waktu 1-3 jam pada setiap suhu untuk melihat perbandingannya.

Selanjutnya dilakukan uji terhadap sifat fisis geopolimer (massa jenis, porositas dan absorpsi) dan uji karakterisasi menggunakan *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR) untuk mengetahui gugus fungsi yang terdapat pada bahan uji, *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia bahan uji, *X-Ray Diffraction* (XRD) untuk mengetahui fase kristal pada bahan uji dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-Ray Spectrcopy* (FESEM-EDS) untuk mengetahui morfologi geopolimer.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Apakah sintesis geopolimer dapat dibuat dari bahan dasar limbah bata tahan api?
2. Bagaimana sifat fisis (massa jenis, porositas, absorpsi) geopolimer yang terbuat dari bata tahan api bekas?
3. Bagaimana hasil karakterisasi menggunakan FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS yang dihasilkan pada geopolimer?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui hasil sintesis geopolimer menggunakan bahan dasar limbah bata tahan api.
2. Mengetahui sifat fisis (massa jenis, porositas, absorpsi) geopolimer yang terbuat dari bata tahan api bekas.
3. Menganalisis hasil dari karakterisasi menggunakan FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS yang dihasilkan pada geopolimer.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Limbah bata tahan api yang digunakan berasal dari Pusat Riset Teknologi Pertambangan-BRIN Tanjung Bintang, Lampung Selatan.
2. Variasi suhu yang digunakan pada penelitian ini adalah 40, 50, 60 dan 70℃ dengan lama waktu 1, 2 dan 3 jam pada setiap suhu.
3. NaOH yang digunakan sebanyak 10 M.
4. Geopolimer dicetak berbentuk silinder diameter 1,27 cm dan tinggi 2,5 cm.
5. Uji fisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu menghitung berat jenis, absorbsi dan porositas.
6. Uji karakterisasi yang digunakan pada penelitian ini menggunakan alat FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat dipeloreh dari penelitian ini adalah:

1. Penelitian ini dapat digunakan sebagai referensi untuk penelitian selanjutnya.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi bagi industri bahan bangunan.
3. Memanfaatkan limbah bata tahan api melalui pembuatan geopolimer sebagai material pengganti semen yang lebih ramah lingkungan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bata Tahan Api

Bata tahan api (*fire brick*) merupakan salah satu kelompok material refraktori yang biasanya digunakan sebagai penahan dan penyimpan panas pada tungku pembakaran atau *furnace*. Bata tahan api adalah jenis bata khusus yang dapat bertahan pada suhu tinggi karena memiliki titik leleh yang tinggi hingga 2552 °F (1400 °C) dan mampu mengisolasi panas. Bahan baku seperti kaolin, bauksit, dan tanah liat api (*fire clay)* menjadi salah satu contoh bahan dasar utama yang sering dipakai dalam pembuatan bata tahan api (Kanolt, 1917).

Gambar 2.1 Limbah bata tahan api.

Bata tahan api dikembangkan pada tahun 1930-an. Bata tahan api merupakan keramik yang dibuat menggunakan tanah liat api (*fire clay*). Tanah liat api mengandung dua komposisi utama silika dan alumina, beberapa unsur lain seperti lempung (*clay)*, magnesium, kromit, silikon karbida dan lain-lain. Kandungan persentase silika dan alumina pada bata tahan api bervariasi berkisar antara 50-60 % silika dan 30-40 % alumina (Sayel *et al.*, 2012). Bata tahan api memiliki ketahanan yang baik terhadap suhu tinggi sampai 1600℃ dan mampu bertahan dalam jangka waktu yang lama walaupun terbakar secara terus menerus tanpa mengalami perubahan bentuk (Sadik *et al.*, 2013).

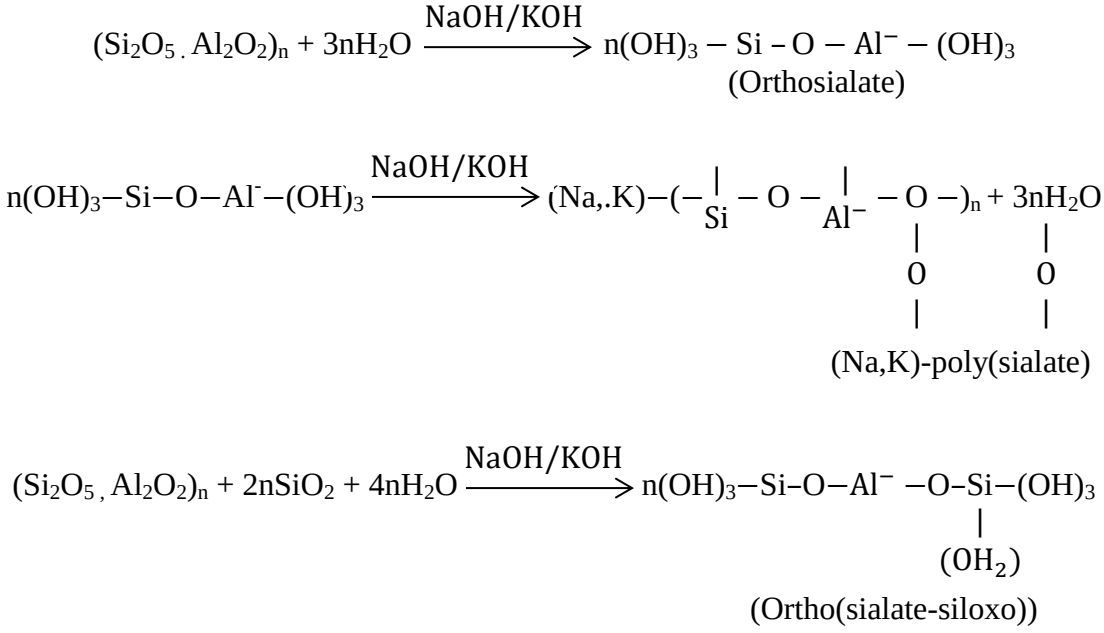
Bahan baku bata tahan api seperti kaolin atau tanah liat terbentuk dari proses pelapukan batuan beku dan memiliki kandungan alumino-silikat yang tinggi. Kaolin juga disebut batuan sedimen yang bersifat plastis dan ukuran butirannya halus. Bata tahan api yang terbuat dari kombinasi kaolin, tanah lempung dan penambahan serbuk gergaji memiliki ketahanan termal yang baik (Bwayo and Obwoya, 2014).

Bata tahan api jenis alumina-silika untuk refraktori berasal dari deposit alami dan buatan. Sumber alami terdiri dari bauksit dan diaspore. Sedangkan yang buatan terdiri dari *calcined alumina, sintered alumina,* dan *fused alumina*. Bauksit adalah biji utama alumunium yang mengandung oksida besi, alumino-silikat dan titania. Bahan baku silika untuk refraktori membentuk sekitar 60 % dari lapisan kerak bumi, sehingga silika mudah tersedia. Sumber alami silika berasal dari kwarsa dan tanah diatomae. Pasir silika adalah bahan baku utama berasal dari pasir pantai atau lempung. Sifat silika selain bersifat tahan api juga mengurangi penyusutan dan

meningkatkan ketahanan asam sehingga tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki titik lebur tinggi (Charles, 2004).

2.2 Geopolimer

Geopolimer adalah suatu polimer anorganik aluminosilikat yang disintesiskan dari bahan-bahan produk samping seperti abu terbang, abu sekam padi yang banyak mengandung alumina dan silika. Geopolimer merupakan produk beton yang reaksi pengikatnya adalah reaksi polimerisasi. Dalam reaksi polimerisasi inilah alumunium dan silika memiliki peran penting dalam ikatan polimerisasi. Semakin besar rasio Si dan Al maka karakter polimer semakin terbentuk kuat. Geopolimer dihasilkan dari geosintesis aluminosilikat polimerik dan alkali-silikat yang menghasilkan ikatan polimer polimer Si-O-Al. Reaksi geopolimerisasi dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2.2 Reaksi geopolimer (Davidovits, 1994).

Secara umum, persamaan reaksi terlihat bahwa pembentukan senyawa geopolimer menghasilkan air yang dikeluarkan selama proses pemanasan. Geopolimer memiliki bentuk dasar polisialat dengan rumus ditunjukkan pada **Persamaan (2.1)**.

$$M_n\{-(SiO_2)_z - AlO_2\}n, {}_wH_2O \quad (2.1)$$

dengan M adalah kation seperti ion kalsium, natrium atau kalium dan *n* adalah derajat polikondensasi, *z* adalah 1, 2, 3. Polisialat memiliki fase amorf hingga semi kristalin. 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 $Si(OH)_4$ dan $Al(OH)_4$ terbentuk, yang kemudian terpolikondensasi menjadi polimer alkali aluminosilikat dengan struktur jaringan berkat penciptaan ikatan silang 3 dimensi. Sifat-sifat geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti karakteristik material dasar, jenis-jenis dan takaran aktivator, modulus aktivator, suhu perawatan, jangka waktu perawatan, dan kadar air perawatan. Komposisi aktivator dalam jumlah yang tepat menjadi salah satu parameter untuk menghasilkan geopolimer dengan mutu yang baik. Studi menunjukkan bahwa bahan bangunan yang terbuat dari beton geopolimer memiliki sifat lebih tahan terhadap korosi dan api, memiliki kekuatan tekan dan tarik yang tinggi jika dibandingkan dengan beton biasa atau beton standar pada umumnya.

Seperti contoh geopolimer berbahan dasar *fly ash* hasil penelitian menunjukkan bahwa beton geopolimer memiliki sifat yang lebih baik dari beton biasa dalam banyak aspek seperti kekuatan tekan, paparan terhadap lingkungan yang agresif, kemampuan kerja dan paparan terhadap suhu tinggi (Yasin., 2017).

2.3 Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

Sodium silikat atau disebut juga *water glass* merupakan senyawa yang terdiri dari ion natrium dan ion silikat. Sodium silikat umumnya diproduksi dengan mereaksikan alkali dan silikon dioksida dalam kondisi padat. Pembuatan sodium silikat untuk skala industri dimulai oleh studi Johan Nepomuk Von Fuch seorang professor dari Munich pada tahun 1828. Sodium silikat dapat dibuat dengan 2 proses yaitu proses kering dan proses basah. Pada proses kering, pasir (SiO_2) dicampur dengan sodium karbonat (Na_2CO_3) atau dengan kalium karbonat (K_2CO_3) pada temperatur 1100-1200°C. Hasil reaksi tersebut menghasilkan kaca (*cullets*) yang dilarutkan kedalam air dengan tekanan tinggi menjadi cairan yang bening dan agak kental. Sedangkan pada proses pembuatan basah, pasir (SiO_2) dicampur dengan sodium hidroksida (NaOH) melalui proses filtrasi akan menghasilkan sodium silikat yang murni (Sanjaya and Leoindarto, 2006).

Sodium silikat terdapat dalam dua bentuk, yaitu berupa padat dan larutan. Untuk campuran beton lebih banyak digunakan dengan bentuk larutan. Sodium silikat atau yang lebih dikenal dengan nama *water glass*, pada mulanya digunakan sebagai campuran dalam pembuatan sabun. Tetapi dalam perkembangannya sodium silikat

dapat digunakan untuk berbagai macam keperluan, antara lain untuk bahan campuran semen, pengikat keramik, *coating*, campuran cat serta dalam beberapa keperluan industri, seperti kertas, tekstil dan serat. Beberapa penelitian telah membuktikan bahwa sodium silikat dapat digunakan untuk bahan campuran dalam beton. Sodium silikat yang digunakan pada campuran beton berfungsi sebagai perekat dan pengisi beton. Hal ini dapat meningkatkan kekuatan, daya tahan, dan ketahanan terhadap korosi beton. Dalam aplikasi ini, sodium silikat biasanya digunakan bersamaan dengan bahan kimia pengeras beton lainnya. Sodium silikat juga digunakan dalam produksi batu bata dan blok beton ringan. Ketika dicampur dengan pasir dan bubuk serat, sodium silikat dapat digunakan sebagai agen pengikat yang membantu membentuk blok-blok ini. Penggunaan sodium silikat dalam konstruksi bervariasi tergantung pada kebutuhan proyek dan sifat-sifat spesifik dari material konstruksi yang digunakan (Ibrahim and Kamarudin, 2013).

Dalam penelitian ini sodium silikat digunakan sebagai salah satu alkalin aktivator. Sodium silikat ini merupakan salah satu larutan alkali yang memainkan peranan penting dalam proses polimerisasi. Karena sodium silikat mempunyai fungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi. Reaksi terjadi secara lebih cepat pada larutan alkali yang banyak mengandung larutan hidroksida. Sodium silikat adalah salah satu bahan industri kimia yang banyak dibutuhkan oleh industri kimia dalam negeri. Produk ini juga biasanya digunakan sebagai bahan perekat, cat tahan api, pembuatan keramik, sebagai bahan katalisator yang dapat mempercepat reaksi kimia (Thesman, 2020).

2.4 Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida sering juga disebut *caustic soda* atau soda api dengan rumus kimia NaOH, merupakan *caustic* komersil yang kegunaanya sangat penting sebagai bahan baku atau bahan pembantu pada industri kimia yang terdahulu. *Caustic soda* jika dilihat bentuknya ada dua macam yaitu berbentuk butiran padat berwarna putih, biasanya mempunyai kadar yang mendekati 100% dan dalam bentuk larutan mempunyai kadar yang lebih bervariasi yaitu 40%, 50%, 72%. Sifat senyawa ini mudah menyerap air dan *carbon dioxide* dari udara, larut dalam air, alkohol dan gliserol dan juga bersifat basa. Padatan *caustic soda* mempunyai titik 318°C sedangkan titik didihnya 1350°C (Ullmann's, 1994).

Natrium hidroksida merupakan senyawa kimia dengan alkali tinggi dan b`erfungsi untuk menghilangkan atau membersihkan zat kotoran yang melekat pada serat sisal. Senyawa ini saat dilarutkan dalam air atau dinetralkan dengan cairan asam akan melepaskan panas yang cukup untuk menyalakan bahan mudah terbakar. Dan kemudian NaOH akan membentuk cairan bening yang lebih kental dari air. NaOH bersifat lembab cair dan secara spontan menyerap karbon dioksida dari udara bebas. Dalam hal ini, natrium hidroksida sering dipakai untuk menentukan skala pH dengan menggunakan air netral dan asam klorida (HCL). Sifat-sifat kimia membuatnya ideal untuk digunakan dalam berbagai aplikasi yang berbeda. Natrium hidroksida adalah bahan dasar populer yang digunakan di industri. Sekitar 56% natrium hidroksida yang dihasilkan digunakan oleh industri, 25% di antaranya digunakan oleh industri kertas. Natrium hidroksida juga gunakan dalam pembuatan garam natrium dan kertas.

Natrium hidroksida juga gunakan dalam pembuatan garam natrium dan deterjen43 regulasi pH dan sintesis organik (Kurt and Bittner, 2006).

Natrium Hidroksida (NaOH) bertindak sebagai katalis dalam reaksi untuk mempercepat reaksi. Dimana penggunaan katalis ini jauh lebih reaktif bila dibandingkan dengan menggunakan katalis KOH, hal ini disebabkan karena logam Natrium (Na) memiliki kereaktifan yang lebih tinggi dibandingkan Kalium (K). Natrium hidroksida (NaOH) adalah bahan kimia berbentuk kristal putih padat yang apabila memasuki lingkungan akan mudah bereaksi memecah dengan bahan kimia lain. Seperti halnya natrium hidroksida dimasukkan dalam air akan memisahkan kation natrium (sodium atom bermuatan positif) dan anion hidroksida (oksigen dan hidrogen atom bermuatan negatif). Natrium hidroksida mudah larut dalam air dan akan menghasilkan panas (*eksoterm*). Ion OH^- pada larutan alkali tersebut akan menjadi promotor pada reaksi aluminium dengan air. Ketika reaksi antara Al dan air dibantu oleh alkali, ion OH^- dapat merusak lapisan oksida pelindung pada permukaan aluminium (Kumar and Surendra, 2013).

2.5 Sifat Fisis

Untuk mengetahui sifat fisis suatu material, maka dilakukan pengujian pada material tersebut. Adapun ujinya sebagai berikut.

2.5.1 Massa Jenis

Berdasarkan SNI 1969-2008 massa jenis merupakan perbandingan antara berat dari satuan volume dari suatu material terhadap berat air dengan volume yang sama pada suhu yang ditentukan. Nilai uji massa jenis berdasarkan SNI 1969-2008 dapat diketahui dengan **Persamaan (2.2)**.

$$\rho = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_{air} \tag{2.2}$$

Keterangan:

ρ = massa jenis zat (g/cm^3)
ρ_{air} = massa jenis air (g/cm^3)
m_1 = massa kering (g)
m_2 = massa jenuh (g)
m_3 = massa yang berada dalam air (g)

Pada penelitian yang telah dilakukan Ridwan (2018) data hasil pengukuran massa jenis terhadap perlakuan suhu pada material geopolimer dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

Tabel 2.1 Hasil pengukuran massa jenis mortar geopolimer

Kondisi	Sampel 1 (g)	Sampel 2 (g)	Rata-rata (g/cm^3)
Massa uji kering	2,60	2,64	2,62
Massa uji jenuh	2,62	2,68	2,65
Massa uji dalam air	2,82	2,76	2,79

Pada **Tabel 2.1** menunjukkan nilai rata-rata hasil pengukuran massa jenis mortar geopolimer yang dilakukan oleh (Ridwan, 2018) dari hasil penelitiannya. Hasil ini menunjukkan adanya perubahan massa sebelum dan sesudah pada setiap beda pengujiannya karena terjadi penyerapan air pada sampel sehingga menyebabkan massa jenis bertambah.

Perbedaan massa jenis antara bahan keramik dan bahan besi biasanya cukup signifikan karena sifat-sifat kimia dan struktur kristal yang berbeda antara kedua bahan tersebut. Massa jenis keramik cenderung lebih rendah dibandingkan dengan bahan logam seperti besi. Massa jenis keramik berkisar antara 2 hingga 3 gram per sentimeter kubik (g/cm^3), tergantung pada jenis keramiknya. Contohnya, porselen memiliki massa jenis sekitar 2,4 g/cm^3, sementara aluminium oksida (alumina) memiliki massa jenis sekitar 3,97 g/cm^3. Sedangkan, pada massa jenis besi jauh lebih tinggi dibandingkan dengan keramik. Massa jenis besi berkisar antara 7 hingga 8 g/cm^3, tergantung pada jenis besinya. Besi murni memiliki massa jenis sekitar 7,87 g/cm^3. Perbedaan massa jenis antara keramik dan besi terletak pada fakta bahwa keramik memiliki massa jenis yang jauh lebih rendah dibandingkan besi. Hal ini disebabkan oleh perbedaan struktur atomik dan molekuler antara kedua jenis bahan ini. Massa jenis yang lebih tinggi pada besi juga membuatnya lebih padat dan berat dibangdingkan dengan keramik per satuan volume (Callister and Rethwisch, 2018).

2.5.2 Porositas

Porositas merupakan persentase pori-pori atau ruang kosong terhadap volume total benda. Porositas merupakan sifat fisik batuan yang menunjukkan kemapuan batuan untuk menampung fluida didalam pori-porinya. Pengujian porositas dilakukan untuk mengetahui besarnya persentase pori-pori semen geopolimer terhadap volume mortar. Porositas berhubungan erat dengan permeabilitas beton. Porositas juga dapat diakibatkan adanya partikel-partikel bahan penyusun mortar yang relatif besar, sehingga kerapatan tidak maksimal. Porositas menggambarkan besar kecilnya

kekuatan beton dalam menopang suatu kontruksi. Semakin tinggi tingkat kepadatan pada mortar maka semakin besar kuat tekan atau mutu mortar, sebaliknya semakin besar porositas mortar, maka kekuatan mortar akan semakin kecil (Tumingan *et al.*, 2016).

Menurut ASTM-C 642-06 nilai porositas dapat dihitung menggunakan **Persamaan (2.3)**.

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

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

Pada penelitian yang telah dilakukan (Irhab, 2022) berikut hasil uji porositas mortar geopolimer dari berbagai variasi suhu dan waktu yang dihasilkan dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

Tabel 2.2 Hasil uji porositas mortar geopolimer

MIX	Keterangan	Porositas (%)		
		7 Hari	14 Hari	28 Hari
1	Kontrol PC	7,99	8,64	11,00
2	Kontrol 12M	4,97	10,76	15,11
3	60℃ 24 Jam	4,06	7,76	13,19
4	80℃ 24 Jam	3,57	3,58	7,40
5	100℃ 24 Jam	2,43	3,37	3,66
6	60℃ 3 Jam	3,44	4,10	5,93
7	80℃ 3 Jam	5,50	6,44	8,45
8	100℃ 3 Jam	2,22	4,41	6,42
9	60℃ 6 Jam	3,06	4,32	5,38
10	80℃ 6 Jam	3,41	3,99	6,79
11	100℃ 6 Jam	3,41	3,84	8,30

Pada **Tabel 2.2** menunjukkan hasil uji porositas mortar geopolimer variasi waktu dan suhu berbahan dasar abu terbang. Uji porositas dilakukan pada usia 7, 14, dan 28 hari memiliki nilai porositas yang inkonsisten. Namun sebaliknya, nilai porositas konsisten naik seiring bertambahnya usia benda uji.

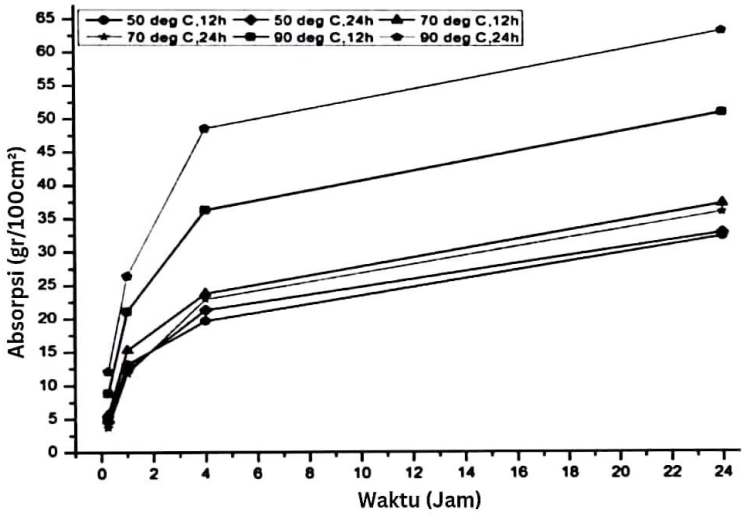
2.5.3 Absorpsi

Absorpsi dilakukan untuk mengetahui berapa banyak jumlah air yang terserap oleh sampel semen geopolimer dengan prinsip perendaman dalam air dengan waktu perendaman 24 jam. Nilai serapan air (absorpsi) dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti tingkat kandungan air awal yang terdapat dalam sampel juga dipengaruhi oleh keberadaan pori dalam sampel. Menurut (Lamond and Pielert, 2006) serapan air merupakan fungsi dari porositas dan ukuran pori, sehingga semakin banyak jumlah pori dan semakin besar ukuran pori yang terbentuk maka nilai serapan air juga akan semakin besar demikian pula sebaliknya. Menurut ASTM-C 642-06 nilai uji absorpsi dapat dihitung menggunakan **Persamaan (2.4)**.

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \qquad (2.4)$$

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

Pada penelitian yang telah dilakukan (Malik, 2016) hubungan peningkatan suhu dan waktu pemanasan terhadap nilai absorpsi dari geopolimer dapat dilihat pada **Gambar 2.3**.



Gambar 2.3 Grafik absorpsi geopolimer (Malik, 2016).

Berdasarkan **Gambar 2.3** diatas dapat dilihat bahwa secara umum nilai absorpsi geopolimer dengan variasi suhu dan waktu pemanasan menunjukkan bahwa dengan meningkatnya suhu dan waktu yang digunakan maka nilai absorpsi akan semakin tinggi. Peningkatan terbesar terjadi pada suhu 90℃ dengan kenaikan sebesar 5-6%, sementara pada suhu 50℃ dan 70℃ nilai absorpsi hanya sebesar 3%.

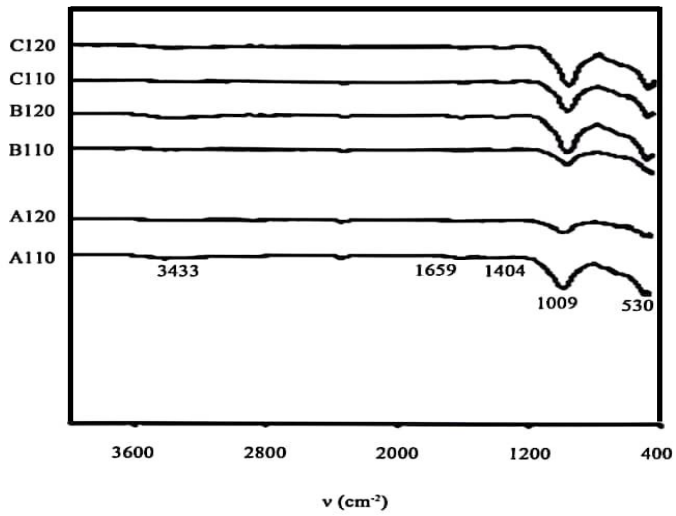
2.6 Karakterisasi Material

2.6.1 *Fourier Transform Infrared Spectroscopy* (FTIR)

Spektrofotometri inframerah adalah salah satu teknik identifikasi yang dapat mengetahui jenis-jenis vibrasi antar atom, menganalisa senyawa organik dan anorganik, serta analisis senyawa secara kuantitatif dan kualitatif. Analisis kualitatif dilakukan untuk menentukan struktur polimer dan kopolimer sedangkan analisis kuantitatif ditentukan berdasarkan hukum Lambert Beer (Skoog, 1998).

Spektrofotometri inframerah pada umumnya digunakan untuk melakukan penentuan jenis gugus fungsi suatu senyawa organik, mengetahui informasi struktur suatu senyawa organik karena spektrumnya yang sangat kompleks yang terdiri dari banyak puncak-puncak. Selain itu, masing-masing kelompok fungsional menyerap sinar inframerah pada frekuensi yang unik. Spektrum inframerah yang dihasilkan dari pentransmisian cahaya akan melewati sampel, pengukuran intensitas cahaya dengan detektor dan dibandingkan dengan intensitas tanpa sampel sebagai fungsi panjang gelombang. Spektrum inframerah yang diperoleh kemudian diplot sebagai intensitas fungsi energi, panjang gelombang μm) atau bilangan gelombang (cm^{-1}) (Marcott, 1986).

Pada penelitian yang telah dilakukan (Beleuk à Moungam *et al*., 2017) hasil karakterisasi FTIR sampel geopolimer berbahan dasar dari limbah batu bata dan abu layang dapat dilihat pada **Gambar 2.4**.



Gambar 2.4 Spektrum FTIR geopolimer limbah batu bata dan abu layang (Beleuk à Moungam *et al.*, 2017).

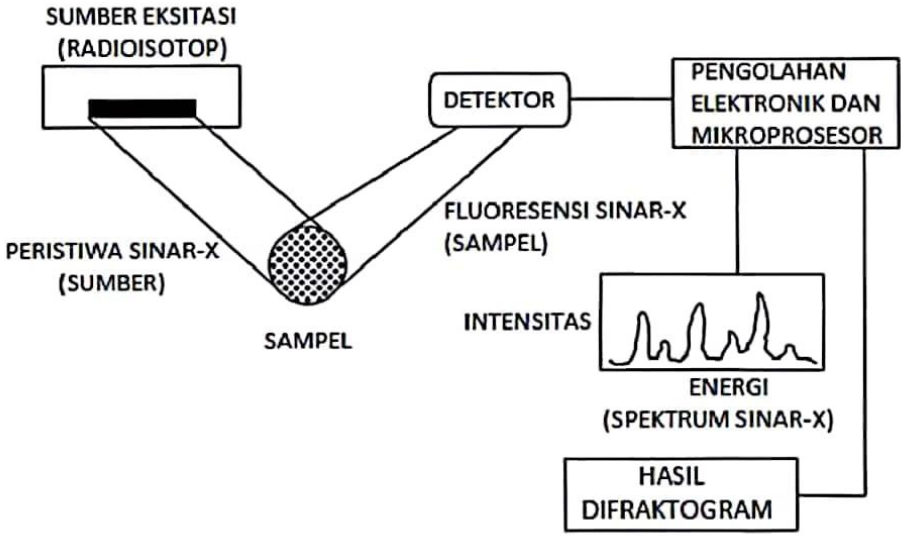
Gambar 2.4 menunjukkan hasil FTIR dari geopolimer limbah batu bata dan abu layang. Dari spektrum data tersebut sampel yang digunakan memiliki gugus peregangan Si-O-Al dan Si-O-Si di kisaran bilangan gelombang 1000 cm^{-1}. Pada sampel ditunjukkan peregangan asimetris obligasi Si-O-Al dan Si-O-Si untuk sampel A, B dan C masing-masing muncul pada bilangan gelombang 1009, 999, 1005 cm^{-1} dengan komposisi bubuk limbah batu bata yang digunakan sebanyak 110 g dan pada 1007, 1003 dan 989 cm^{-1} dengan komposisi bubuk limbah batu bata yang digunakan sebanyak 120 g. Sedangkan pada rentang bilangan gelombang 530-542 cm^{-1} untuk sampel A, 525-538 cm^{-1} untuk sampel B dan 538-536 cm^{-1} untuk sampel C menunjukkan vibrasi dari gugus Al-O.

2.6.2 *X-Ray Fluorence* (XRF)

XRF adalah alat uji yang digunakan untuk menganalisis unsur yang terkandung dalam bahan secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisis kualitatif memberikan informasi jenis unsur yang terkandung dalam bahan yang dianalisis, yang ditunjukkan oleh adanya spektrum unsur pada energi sinar-X karakteristiknya. Sedangkan analisis kuantitatif memberikan informasi jumlah unsur yang terkandung dalam bahan yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum (Kalnicky and Singhvi, 2001).

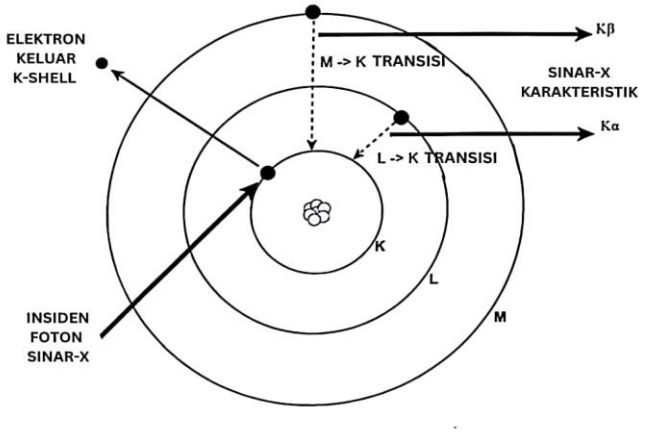
Analisis menggunakan XRF dilakukan berdasarkan identifikasi dan pencacahan sinar-X karakteristik yang terjadi dari peristiwa efek fotolistrik. Efek fotolistrik terjadi karena elektron dalam atom target (sampel) terkena sinar berenergi tinggi (radiasi gamma, sinar-X). Bila energi sinar tersebut lebih tinggi dari pada energi ikat elektron dalam orbit K, L atau M atom target, maka elektron atom target akan keluar

dari orbitnya. Dengan demikian atom target akan mengalami kekosongan elektron. Kekosongan elektron ini akan diisi oleh elektron dari orbital yang lebih luar diikuti pelepasan energi yang berupa sinar-X. Jika elektron kulit yang diganti adalah elektron kulit K, maka emisi sinar-X dikenal sebagai sinar-X deret K. Demikian pula, transisi kulit L menghasilkan sinar-X deret L. Garis-garis spektrum sinar-X dikelompokkan secara seri (K, L, M). Semua garis dalam rangkaian hasil transisi elektron dari berbagai tingkatan ke kulit yang sama. Sebagai contoh, transisi dari kulit L dan M ke kulit K menyediakan garis spektral yang masing-masing disebut Kα dan Kβ. Spektrum sinar-X dihasilkan oleh semua elemen dalam sampel. Setiap elemen akan memiliki banyak garis karakteristik dalam spektrum, karena sinar-X yang berbeda akan dipancarkan untuk setiap jenis transisi orbital. Adapun prinsip kerja XRF ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Skematik XRF (Kalnicky and Singhvi, 2001).

Apabila sumber eksitasi 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 untuk mendeteksi atau menganalisis sinar-X karakteristik yang dilepaskan oleh sampel. Sinar-X yang dihasilkan merupakan suatu gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X karakteristik. Peristiwa tersebut dapat dilihat pada **Gambar 2.6** (Kalnicky and Singhvi, 2001).



Gambar 2.6 Mekanisme fluoresensi sinar-X (Kalnicky and Singhvi, 2001).

Radiasi sinar-X dapat terjadi karena transisi elektron dari orbital yang memiliki tingkat energi lebih tinggi menuju orbital dengan tingkat energi yang lebih rendah dengan melalui tahapan yaitu ketika sebuah elektron yang terletak di kulit bagian

dalam terpental ke luar atom karena adanya berkas cahaya atau berkas elektron dari luar. Kekosongan elektron ini selanjutnya digantikan oleh elektron dari kulit yang lebih luar (Kalnicky and Singhvi, 2001). Pada penelitian yang telah dilakukan (Youssef *et al*., 2019) hasil analisis XRF geopolimer berbahan dasar dari limbah bata dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Hasil analisa XRF geopolimer dari limbah bata

Rumus kimia	Hasil analisis limbah batu bata(%)
SiO_2	73,106
Al_2O_3	12,68
Fe_2O_3	6,74
K_2O	3,45
MgO	1,41
CaO	1,02
TiO_2	0,87
MnO	0,68
Ni_2O_3	0,009
Cu_2O	0,007
GaO_3	0,008
ZnO	0,02

Pada **Tabel 2.3** menunjukkan hasil analisis XRF pada material geopolimer berbahan dasar dari limbah bata memiliki kandungan senyawa kimia yang didominasi oksida silika dan alumina.

2.6.3 *X-Ray Difraction* (XRD)

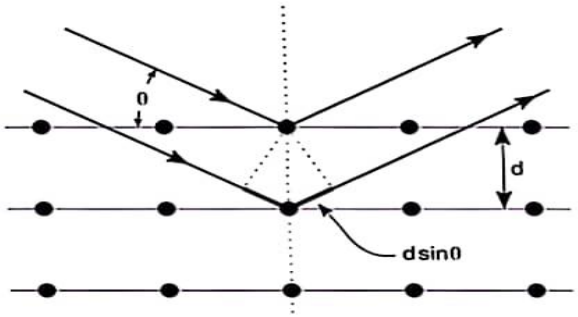
Sinar-X pertama kali ditemukan oleh Wilhelm Conrad Rontgen pada tahun 1895. Tidak seperti cahaya biasa, sinar ini tidak terlihat, namun berada dalam garis lurus dan mempengaruhi film fotografi dengan cara yang sama seperti cahaya. Sinar-X yang digunakan dalam difraksi memiliki panjang gelombang pada kisaran 0,5-0.2 Å.

XRD merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengidentifikasi susunan atom dalam suatu bahan dengan memanfaatkan gelombang elektromagnetik dari sianr-X dan struktur kisi sebagai parameternya. Berkas sinar-X yang saling menguatkan itu disebut sebagai berkas difraksi (Cullity, 1978).

Difraksi sinar-X pertama kali dieksperimenkan pada tahun 1912 oleh Friedish, Knipying dan Von Laue. Teknik ini memiliki kelemahan yaitu membutuhkan waktu yang cukup lama dan kurang paraktis karena umumnya mesin bergerak secara Percobaan dilakukan kembali oleh dua fisikawan Inggris, W. H. Bragg 1862-1942 dan putranya W. L. Bragg 1890-1972. Mereka berhasil menganalisis percobaan Laue dan mampu menampilkan kondisi yang diperlukan untuk difraksi dalam bentuk matematika jauh lebih sederhana. Percobaan dilakukan dengan cara menambahkan sinar-X pada sampel padaran kristalin, kemudian sinar tersebut akan terdifraksi. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan untuk mendeteksi berkas sinar-X yang didifraksi oleh sampel. Sampel serbuk memiliki bidang-bidang kisi yang tersusun secara acak dengan berbagai kemungkinan orientasi, begitu pula partikel-partikel kristal yang tedapat didalamnya. Setiap kumpulan bidang kisi tersebut memiliki beberapa sudut orientasi tertentu, sehingga dapat dituliskan sebagai:

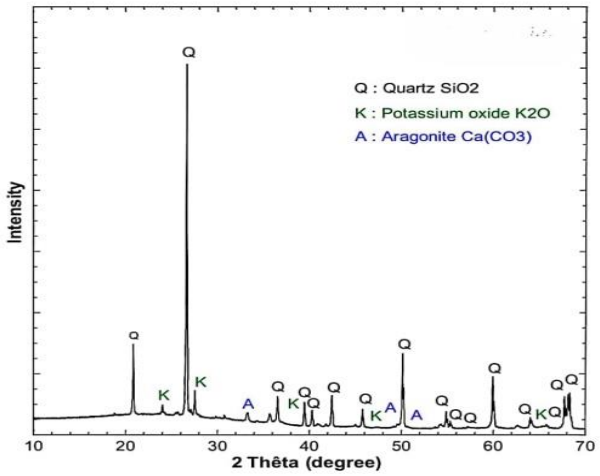
$$2d \sin\theta = n\lambda \tag{2.5}$$

Persamaan di atas dikenal sebagai hukum Bragg, dengan θ = sudut difraksi, λ = panjang gelombang sinar-X dan d adalah jarak antar bidang.



Gambar 2.7 Difraksi sinar-X pada kisi kristal (Cullity,1978).

Jika berkas pararel sempurna, maka sinar-X monokromatik sempurna dengan panjang gelombang λ merupakan sianr datang pada kristal dengan sudut θ, dimana θ diukur antara berkas datang dan bidang kristal tertentu. Keuntungan utama penggunaan sinar-X dalam karakterisasi material adalah kemampuan penetrasinya, sebab sinar-X memiliki energi yang sangat tinggi akibat panjang gelombangnya (Cullity, 1978). Pada penelitian yang telah dilakukan (Youssef *et al*., 2019), berikut merupakan hasil karakterisasi XRD geopolimer dari limbah bata dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.

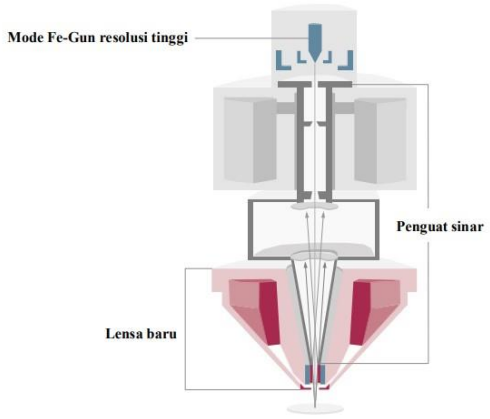


Gambar 2.8 Pola XRD geopolimer limbah bata (Youssef *et al*., 2019).

Pada **Gambar 2.8** menunjukkan hasil XRD geopolimer berbahan dasar dari limbah batu bata api. Fasa kristalin pada geopolimer ini menunjukkan *quartz* (Si_2O) sebagai fase pengkristalan utama dalam limbah batu bata tersebut. Sedangkan kalsit ($CaCO_3$) dan kalium oksida (K_2O) diidentifikasi sebagai unsur-unsur yang memiliki konstituen minor.

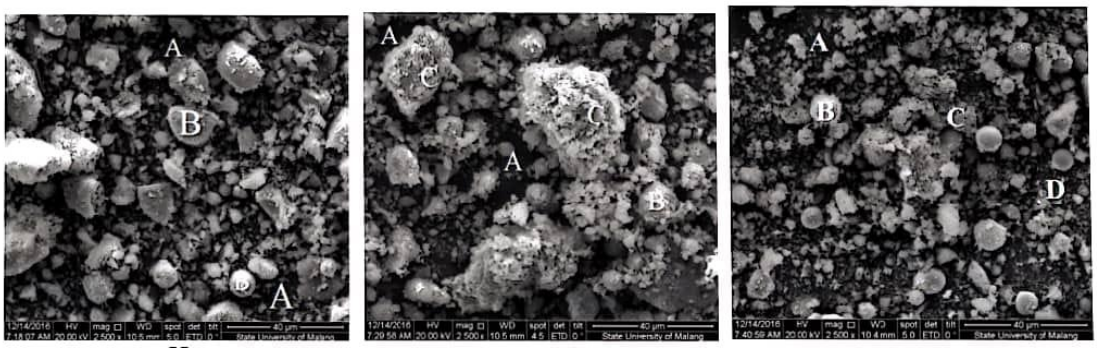
2.6.4 Field Emission Scanning Electron Microscopy – Energy Dispersive Spectroscopy (FESEM-EDS)

Field Emission Scanning Electron Microscopy merupakan metode analisis untuk mengetahui morfologi permukaan suatu sampel dan *Energy Dispersive Spectroscopy* merupakan metode analisis untuk mengetahui presentase unsur kimia yang terkandung pada sampel. FESEM menghasilkan pencitraan resolusi sangat tinggi pada potensial listrik yang rendah sekitar 0,5-30 kV sehingga menghasilkan gambar yang jelas dan tidak terdistorsi. FESEM memiliki daya pisah dalam skala nano dengan kemampuan perbesaran sekitar 10-300.000 kali (Hak *et al*., 2015). Skema FESEM-EDS disajikan pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Skema FESEM-EDS (Boese *et al*., 2016).

Gambar 2.9 menunjukkan mode *field emitter gun* resolusi tinggi secara langsung menembakkan berkas elektron yang difokuskan oleh lensa elektromagnetik untuk memindai permukaan sampel, dimana elektron yang dipantulkan menciptakan gambar permukaan dan topografi sampel. Pada penelitian yang telah dilakukan (Hakim *et al*., 2017) hasil karakterisasi pada SEM dapat dilihat pada **Gambar 2.10**.



Gambar 2.10 Bentuk morfologi SEM (Hakim *et al.*, 2017).

Pada **Gambar 2.10** menunjukkan hasil analisis SEM sampel geopolimer dengan penambahan serbuk alumunium dan serat eceng gondok yang dilakukan (Hakim *et al.*, 2017). Pada sampel geopolimer tersebut menunjukkan morfologi yang didominasi oleh matriks geopolimer (A), material yang tidak bereaksi (B), pori (C) dan partikel serat (D).

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juni 2023 sampai dengan bulan Agustus 2023. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Non-Logam, Pusat Riset Teknologi Pertambangan-BRIN, Jl. Ir. Sutami, Tanjung Bintang, Lampung Selatan.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan pada penelitian ini berupa timbangan digital, wadah nampan, baskom, peralatan gelas, sendok, cetakan pipa silinder ukuran 0,5 *inch* (2,5 cm x 1,27 cm), sarung tangan, mesin oven, *ball mill* merk *Yuema Helical Great type* TR67-A-D112.M4 no. 01307.30166, tumbukan besi, dan untuk karakterisasi digunakan FTIR *Bruker Alpha* II, XRF *Type* 7602 EA, XRD *Type* 9430 030 40602 dan FESEM *Thermo Scientific Quattro S*-EDS *Detector* JEOL JSM-IT800.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini berupa limbah bata tahan api, Na_2SiO_3 merk ROFA (kadar : min 58%), NaOH merk *Merck* (kadar : min 99%) dan air.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur yang digunakan pada penelitian ini memiliki beberapa tahapan, diantaranya yaitu preparasi sampel, pembuatan sampel, pengujian sampel, dan karakterisasi sampel (FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS). Langkah-langkah yang dilakukan yaitu sebagai berikut.

3.3.1 Preparasi Sampel

Preparasi sampel terdiri dari beberapa tahapan, yaitu preparasi bahan dan preparasi larutan:

1. Preparasi Bahan Dasar

   Tahapan preparasi bahan yaitu sebagai berikut:

   a. Menghancurkan bongkahan bata tahan api bekas menggunakan *ball mill* selama 5 jam.
   b. Mengayak serbuk bata tahan api hasil *ball mill* menggunakan ayakan 200 *mesh* untuk mendapatkan ukuran serbuk yang lebih halus.
   c. Serbuk limbah bata tahan api yang telah halus siap digunakan.

2. Preparasi Larutan Alkali Aktivator

   Tahapan preparasi larutan yaitu sebagai berikut:

   a. Melarutkan NaOH sebanyak 10 M dengan 1000 ml aquades.
   b. Mencampurkan larutan NaOH dengan Na_2SiO_3 perbandingan 1 : 1 dan diaduk sampai homogen.
   c. Menutup rapat larutan kemudian didiamkan selama 24 jam dalam suhu ruang.

3.3.2. Pembuatan Sampel

Tahapan pembuatan sampel yaitu sebagai berikut:

1. Menimbang bahan serbuk bata tahan api sebanyak 450 gram.
2. Melarutkan bahan menggunakan 155 ml campuran larutan NaOH + Na_2SiO_3.
3. Mengaduk bahan dengan sedikit demi sedikit dicampur dengan larutan sampai membentuk tekstur adonan yang kalis.
4. Mencetak adonan pada cetakan silinder hingga padat.
5. Mengeringkan sampel pada suhu ruang (25 ℃).
6. Memanaskan sampel geopolimer pada oven dengan suhu $40, 50, 60$, dan $70℃$ selama 1, 2 dan 3 jam. Komposisi bahan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 3.1**.

Tabel 3.1 Komposisi bahan geopolimer limbah bata tahan api

Sampel	Serbuk Bata Tahan Api (g)	Larutan Alkali Aktivator (ml)	Suhu (℃)	Waktu (jam)
1	450	155	40	1
2	450	155	40	2
3	450	155	40	3
4	450	155	50	1
5	450	155	50	2
6	450	155	50	3
7	450	155	60	1
8	450	155	60	2
9	450	155	60	3
10	450	155	70	1
11	450	155	70	2
12	450	155	70	3

3.3.3 Pengujian Sampel

Pada pelaksanaan pengujian sampel dilakukan uji porositas, absorbsi dan berat jenis. Tahapan pengujian sampel geopolimer yaitu sebagai berikut:

1. Menyiapkan sampel geopolimer yang sudah di oven.
2. Menimbang dan mencatat sampel geopolimer sebelum direndam di dalam air untuk mendapatkan massa kering (m_1).
3. Merendam sampel geopolimer dengan air selama 24 jam.
4. Mengangkat dan mengusap sisi sampel menggunakan lap kain, kemudian menimbang dan mencatat hasilnya untuk mendapatkan massa jenuh (m_2).
5. Menimbang kembali sampel dalam keadaan digantung dalam air dan mencatat hasilnya untuk mendapatkan massa jenuh dalam air (m_3).
6. Menghitung nilai massa jenis dengan persamaan (2.2).

7. Menghitung porositas dengan persamaan (2.3)
8. Menghitung absorpsi menggunakan persamaan (2.4).

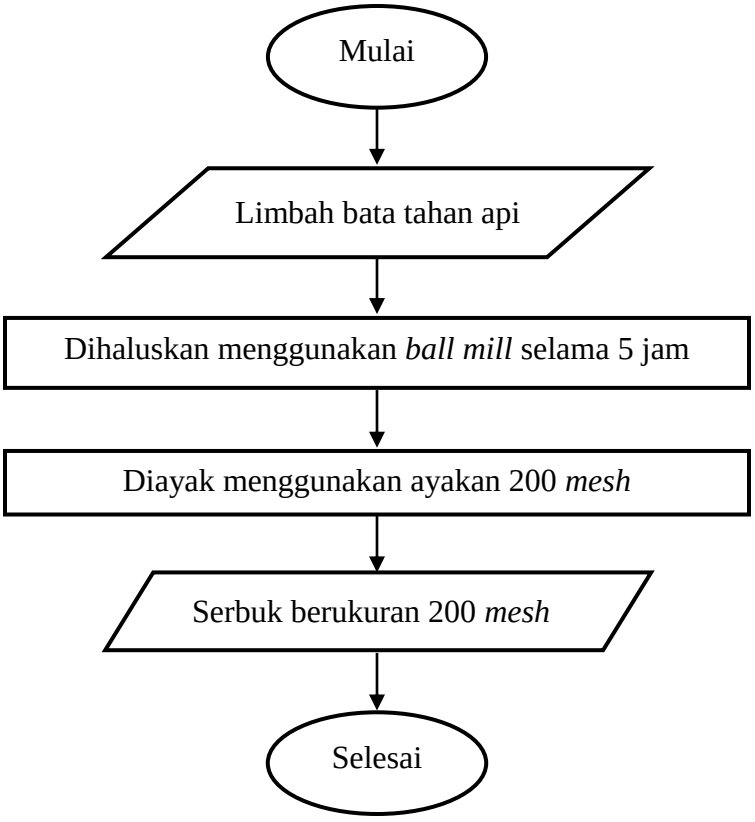
3.4 Karakterisasi

Tahapan pengujian FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS pada sampel geopolimer yaitu sebagai berikut:

1. Menghancurkan sampel geopolimer menggunakan tumbukan dan menghaluskannya menggunakan mortar dan alu.
2. Mengayak produk geopolimer yang telah halus menggunakan ayakan 250 *mesh* sebanyak 10 g.
3. Sampel yang telah halus ukuran 250 *mesh* siap dikarakterisasi menggunakan FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS.

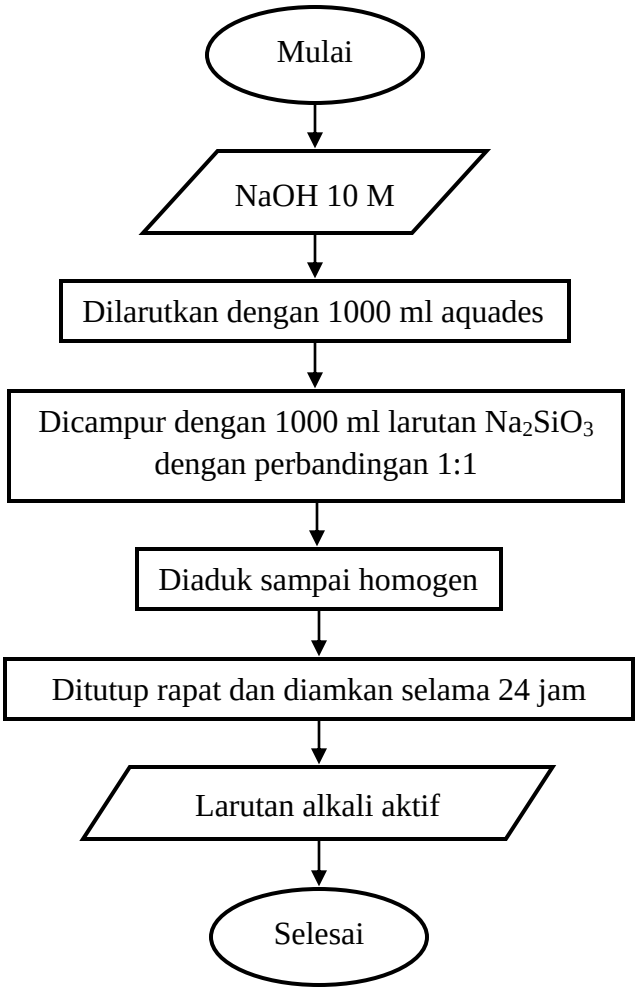
3.5 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir preparasi bahan limbah bata tahan api disajikan pada **Gambar 3.1**.



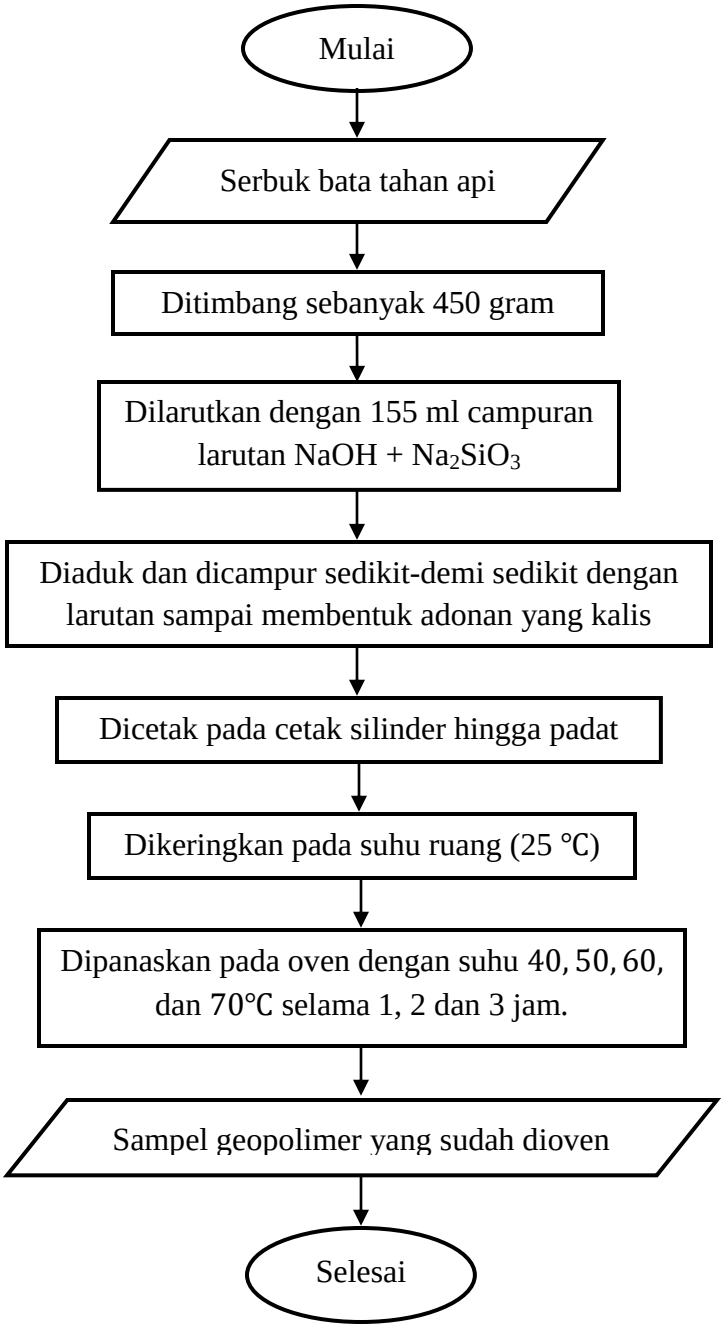
Gambar 3.1 Preparasi bahan limbah bata tahan api.

Diagram alir preparasi larutan disajikan pada **Gambar 3.2**.



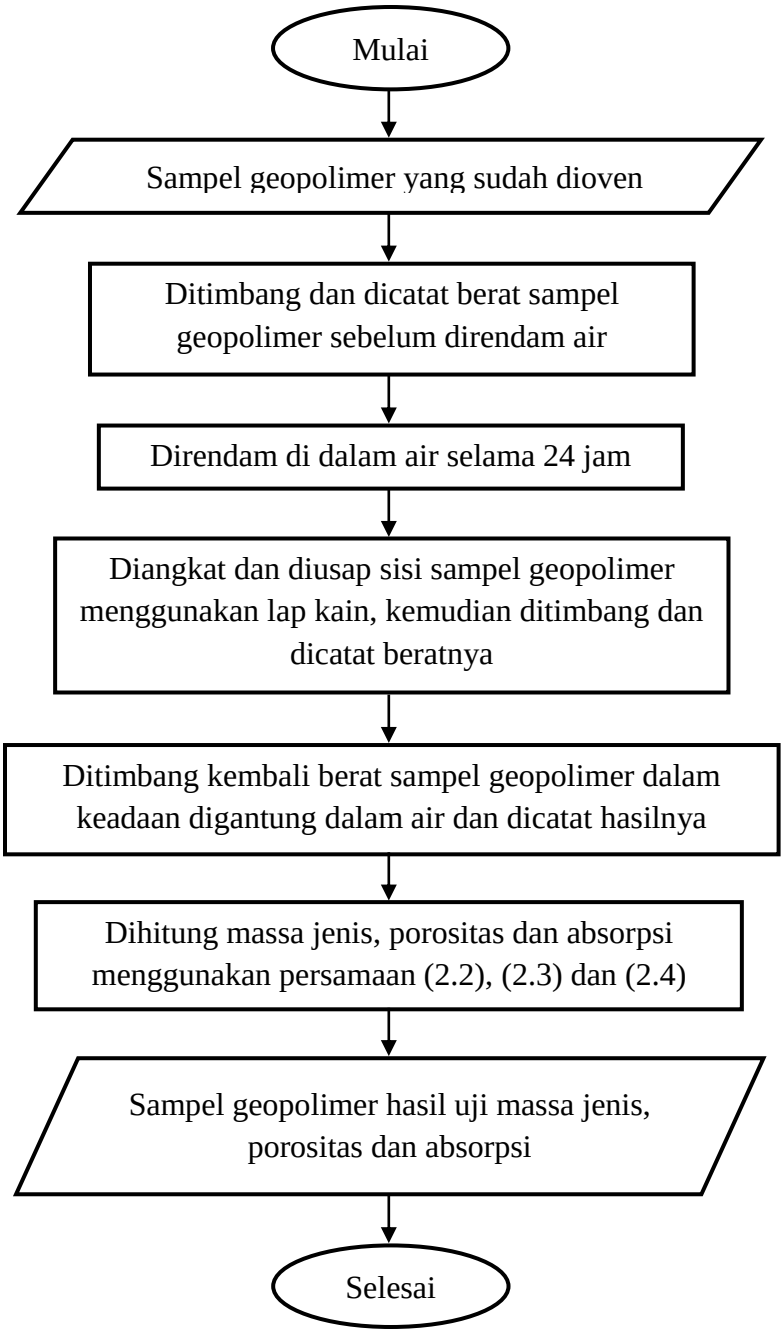
Gambar 3.2 Preparasi larutan alkali aktivator.

Diagram alir pembuatan sampel geopolimer disajikan pada **Gambar 3.3**.



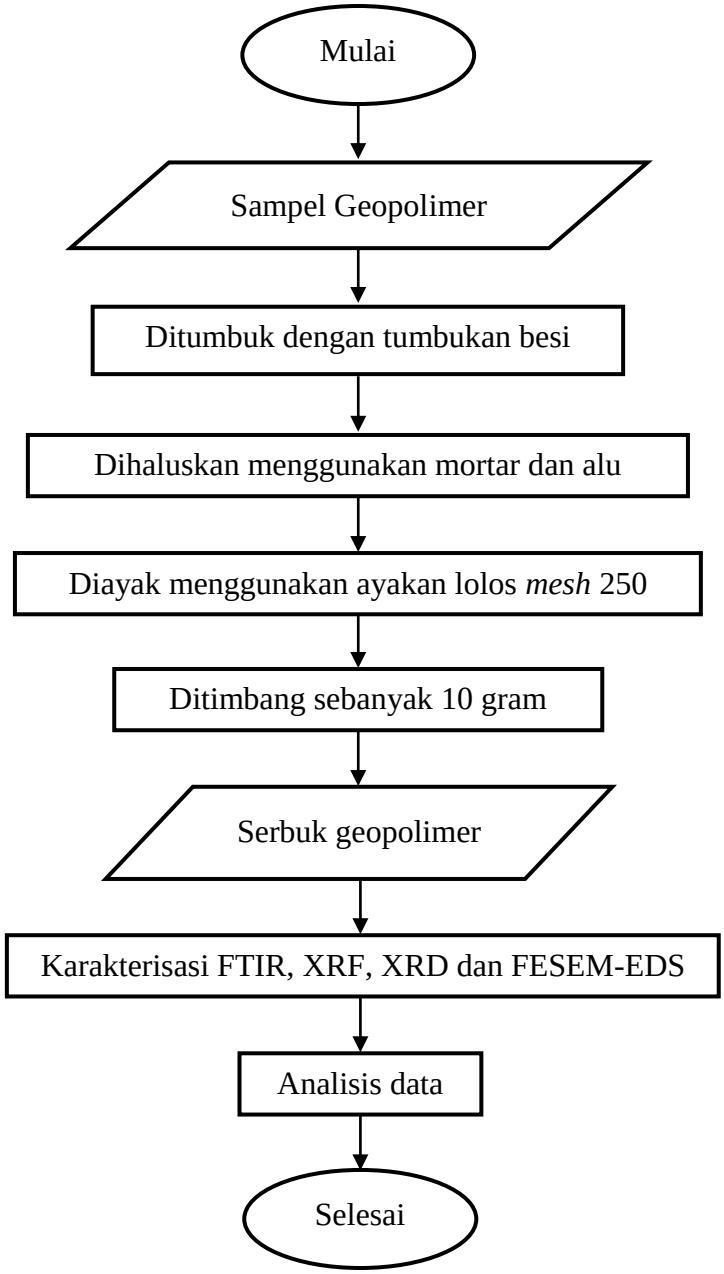
Gambar 3.3 Pembuatan sampel geopolimer.

Diagram alir pengujian massa jenis, porositas dan absorpsi sampel geopolimer disajikan pada **Gambar 3.4**



Gambar 3.4 Pengujian massa jenis, porositas dan absorpsi.

Diagram alir karakterisasi XRF, XRD dan FESEM-EDS sampel geopolimer disajikan pada **Gambar 3.5**



Gambar 3.5 Karakterisasi FTIR, XRF, XRD dan FESEM-EDS.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

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

1. Telah berhasil dilakukan sintesis geopolimer berbahan dasar limbah bata tahan api menggunakan metode aktivasi alkali dengan variasi suhu dan waktu pemanasan dan dihasilkan gugus fungsi pembentuk geopolimer adalah Si-O-(Si,Al) pada hasil FTIR.
2. Berdasarkan hasil uji fisis sampel dari semua variasi suhu dan waktu, diperoleh nilai absorpsi terendah terdapat pada suhu 40 ℃ dengan waktu 1 jam pemanasan yaitu sebesar 7,25 %. Sedangkan sampel yang memiliki nilai porositas cukup tinggi terdapat pada suhu 70 ℃ dengan 3 jam pemanasan yaitu sebesar 22,03 % melebihi dari semen standar pada umumnya sehingga kuat tekan lebih kecil.
3. Hasil FTIR diperoleh gugus fungsi Si-O-Al dan Si-O-Si pada nilai gelombang antara 1011-1012 cm^{-1} dan 533-778 cm^{-1}. Hasil XRF menunjukkan Si, Fe dan Al merupakan unsur yang memiliki kadar tertinggi yang terkandung pada produk sampel geopolimer. Hasil XRD menujukkan fasa yang terbentuk adalah fasa *quartz* (SiO_2), *anorthite* ($Ca_8Si_{16}Al_{16}O_{64}$), *maghenite* ($Fe_{21.33}O_{32}$) dan *ferrosilite*

ferrosilite ($Fe_{6.40}Ca_{1.60}Si_8O_{24}$). Morfologi hasil FESEM terbentuknya fasa kristal yang berbentuk gumpalan-gumpalan, bentuk trigonal dan bentuk batang memanjang sangat padat menunjukkan material tidak bereaksi dengan baik.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian selanjutnya adalah menambahkan variasi bahan lainnya dari penelitian ini untuk mendapatkan kualitas geopolimer yang lebih baik dan perlu dilakukan uji kuat tekan untuk mengukur seberapa besar kekuatan tekan yang dimiliki geopolimer yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

ASTM 642-06. (2006). Standar Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Bearden, J.A. (1967). X-Ray Wavelengths. *Review of Modern Physics*, 86-99.

Beleuk à Moungam, L. M., Mohamed, H., Kamseu, E., Billong, N., and Melo, U. C. (2017). Properties of Geopolymers Made from Fired Clay Bricks Wastes and Rice Husk Ash (RHA)-Sodium Hydroxide (NaOH) Activator. *Materials Sciences and Applications*, 537–552.

Boese, M., Lenz, S., Han, L., Dietl, C., Meyer, S., Drexler, V., and Gamm, B. (2016). Novel Optical Design of Fields Emission SEMs. *Journal Nano Science and Technology*, 59-65.

Bwayo, E., and Obwoya, S. K. (2014). Coefficient of Thermal Diffusivity of Insulation Brick Developed from Sawdust and Clays. *Journal of Ceramics*,1–6.

Callister, W. D., and Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering* : An Introduction (10th Edition). Wiley. 468-479.

Charles., A.S. (2004). Refractories Handbook. Marcel Dekker : New York. 78-89.

Chindaprasirt, P., and Rattanasak, U. (2017). Fire-Resistant Geopolymer Bricks Synthesized from High-Calcium Fly Ash with Outdoor Heat Exposure. *Springer Nature*, 15-32.

Cullity, B. D. (1978). *Elements of X-Ray*. Departement of Metalulurgical Engeenering and Material Science. Addison-Wesley Publishing Company. Boston. 44-500.

Davidovits, J. (1994). *Properties of Geopolymer Cements*. In Proceedings of First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Scientific Research Institute on Binders and Materials, VIPOL Stock Company, Ukraine. 131-149.

Devi, K. S., Lakshmi, V. V., and Alakanandana, A. (2017). Impacts of Cement Industry on Environment-an Overview. *Asia Pacific Journal of Research,* 2347–4793.

Hakim, Y., Kusumastuti, E., and Jumaeri (2017). Sintesis dan Karakterisasi Karakterisasi Geopolimer dengan Penambahan Serat Eceng Gondok dan Serbuk Aluminium. *Indonesian Journal of Chemical Science,* 215–222.

Ibrahim, M., and Kamarudin, H. (2013). Properties of Sodium Silicate Mortar Incorporating Palm Oil Fuel Ash. *Procedia Engineering*, 106-111.

Irhab, H. M. (2022). Pengaruh Variasi Waktu dan Suhu Perawatan terhadap Mortar Geopolimer dengan Abu Terbang dan NaOH 12 Molar sebagai Bahan Dasar. *Rekayasa Teknik Sipil*, 1–10.

Kalnicky, D. J., and Singhvi, R. (2001). Field Portable XRF Analysis of Environmental Samples. *Journal of Hazardous Material*, 93-122.

Kanolt, C. W. (1917). *Melting Points of Fire Bricks*. Washington : U. S. Department of Commerce.

Ken, P.W., Ramli, M., and Ban, C.C. (2015). An Overview on The Influence of Various Factors on The Properties of Geopolymer Concrete Derived from Industrial By-Products. *Construction and Building Materials*, 370–395.

Komnitsas, K., and Zaharaki, D. (2007). Geopolimerisation : A Review and Prospects for the Minerals Industry. *Minerals Engineering*, 1261-1277.

Kumar, S., and Surendra K. S. (2013). Role of Sodium Hydroxide for Hydrogen Gas Production and Storage. *College of Engineering and Computing,* Florida International University, Miami, Florida 33199, USA. 452-463.

Kurt, C., and J. Bittner. (2006). Sodium Hydroxide. In Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Willey Online Library: *Bayer Material Science AG,* Leverkusen, Germany, 1-12.

Lamond, J. F., and Pielert, J. H. (2006). Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials STP 169D. *ASTM International 100 Barr Harbor Drive,* 436-448.

Malik, Y. (2016). Studi Pengaruh Temperatur dan Waktu Curing terhadap Sifat Fisik–Mekanik Semen Geopolimer Berbasis Slag Ferronickel. *Tesis*, Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.

Marcott, C. (1986). Material Characterization Hand Book Vol 1 Infrared Spectroscopy. USA. *ASM International*, 133-139.

Migunthanna, J., Rajeev, P., and Sanjayan J. (2022). Waste Clay Bricks as a Geopolymer Binder for Pavement Construction. *Sustainability*, 1-32.

Panias, D. dan I. Giannopoulou. (2006). Development of Inorganic Polymeric Materials based on Fired Coal Fly Ash. *Acta Metallurgica Slovaca*, 321-327.

Pranaka, K. (2022). Pengaruh Variasi Komposisi Material Terhadap Pembentukan Bata Tahan Api. *Skripsi*. Universitas Lampung. Bandarlampung.

Rahman, R. A., Kusumastuti, E., and Widiarti, N. (2020). Pengaruh Rasio Mol M_2O/SiO_2 dan M_2O/Al_2O_3 (M: Na dan K) terhadap Karakteristik Geopolimer Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science.* 63-70.

Ridwan, M. (2018). Karakteristik Beton Geopolimer Menggunakan Limbah Fly Ash PLTU Tanjung Jati B Jepara (Characteristic Of Geopolymer Concrete Using Fly Ash Waste From Pltu Tanjung Jati B Jepara). *Skripsi*. Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Sadik, C., Albizane, A., and El Amrani, I. E. (2013). Production of porous firebrick from mixtures of clay and recycled refractory waste with expanded perlite addition. *Journal of Materials and Environmental Science*, 981–986.

.

San, F. P., Subaer., and Sujiono, E. H. (2016). Pengembangan Geopolimer Tipe Poly (Ferro-Sialate) Berbahan Dasar Lempung Laterit Untuk Aplikasi Material Struktural. *Jurnal Sains Dan Pendidikan Fisika*, 337–345.

Sanjaya, A., and Leoindarto, C.Y. (2006). Komposisi Alkaline Aktivator dan Fly Ash untuk Beton Geopolimer Mutu Tinggi. *Bachelor thesis*, Petra Christian University.

Sayel, M. F., Ghazi, S. A., and Suleiman, Q. A. E. (2012). Improvement of the Refractoriness under Load of Fire-Clay Refractory Bricks. *Improvement of the refractoriness*, 161–172.

Skoog, D. (1998). *Principles Instrumental Analysis 5 th Edition.* New York: John wiley and Sons. 67-73.

Song, X. (2007). Development and Performance of Class F Fly Ash based Geopolymer Concretes againt Sulphuric Acid Attack. *Thesis. Australia:* School of Civil and Environmental Eingineering the Unversity of New South Wales Sydney.

SNI 1969-2008 : Cara Uji Massa Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar. Bandar Standardisasi Nasional.

SNI 15-2049-2004 : Semen Portland. Bandar Standardisasi Nasional.

SNI 15-2049-1994 : Syarat Mutu dan Cara Uji Semen Portland. Badan Standardisasi Nasional.

Temuujin, J., A. van Riessen, R. Williams. (2009). Influence of Calcium Compounds on The Mechanical Properties of Fly Ash Geopolymer Pastes. *Journal of Hazardous Materials*, 82–88.

Thesman, C. (2020). Pabrik Sodium Silikat (Na_2SiO_3) dari Pasir Silika dan NaOH dengan Kapasitas 80.000/tahun. *Skripsi.* Universitas Surabaya.

Tumingan, T., Tjaronge, M. W., Sampebulu, V., and Djamaluddin, R. (2016). Penyerapan dan Porositas pada Beton Menggunakan Bahan Pond Ash sebagai Pengganti Pasir. *Jurnal Poli-Teknologi,* 1-8.

Ullmann's, (1994). *Encyclopedia of Chemical Industry*. Third Edition, Volume A5, Jhon Willey and Son. New York.

Yasin, A. K. (2017). Rekayasa Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash. *Skripsi*. Institut Teknologi Sepuluh November. Surabaya.

Young. R. A. (1993). *The Rietveld Method*. Oxford University Press. New York. 299-315.

Youssef, N., Rabenantoandro, A. Z., Dakhli, Z., Chapiseau, C., Waendendries, F., Hage Chehade, F., and Lafhaj, Z. (2019). Reuse of Waste Bricks: A New Generation of Geopolymer Bricks. *SN Applied Sciences*, 1–10.