

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BENTONIT DAN ABU CANGKANG
SAWIT TERHADAP PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER**

(Skripsi)

Oleh

**Yugo Chambioso
NPM 1817041058**



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022**

ABSTRAK

PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BENTONIT DAN ABU CANGKANG SAWIT TERHADAP PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER

Oleh

YUGO CHAMBIOSO

Mortar geopolimer adalah alternatif untuk mendapatkan mortar ramah lingkungan dengan mensintesis bahan yang mengandung banyak alumina dan silika. Tujuan dari penelitian ini yaitu mengetahui pengaruh variasi komposisi serta penentuan kelayakan bentonit dan abu cangkang sawit sebagai bahan dalam pembuatan mortar geopolimer. Semua material dihaluskan dan diayak, lalu dicampur, kemudian dicetak dengan cetakan kubus $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dan dibiarkan selama 24 jam. Setelah itu sampel dikeringkan dengan suhu ruang selama 24 jam kemudian dipanaskan menggunakan oven pada suhu $60 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $80 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam, untuk selanjutnya dilakukan pengujian (Uji Fisis, Uji Mekanis, XRF, XRD, SEM). Berdasarkan hasil penelitian didapatkan hasil yang optimum yaitu pada sampel I pada suhu pemanasan $80 \text{ }^\circ\text{C}$ diperoleh kekuatan tekan optimal: 11,94 Mpa, nilai massa jenis: $2,42 \text{ g/cm}^3$, porositas: 8,43%, dan absorpsi: 3,48%. Hasil uji XRF yang dihasilkan 55,59% SiO_2 , 9,45% Al_2O_3 , dan 8,22% Fe_2O_3 dengan fase dominan berupa *quartz*, *anorthite*, *magnetite*, *microcline intermediate* dan *silimanite*. Hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) menunjukkan bagian permukaan berbentuk bulat tidak beraturan dan tidak banyak menghasilkan pori-pori, sehingga memiliki nilai kuat tekan tertinggi. Serta unsur yang terdeteksi dengan EDS yaitu C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, dan P dan unsur yang paling merata penyebaran adalah unsur Si dan Al.

Kata kunci: geopolimer, karakterisasi, komposisi, mortar, pemanasan.

ABSTRACT

EFFECT OF VARIATIONS IN THE COMPOSITION OF BENTONITE AND PALM SHELL ASH ON THE MANUFACTURE OF GEOPOLYMER MORTAR

By

YUGO CHAMBIOSO

Geopolymer mortar is an alternative to obtaining environmentally mortar by synthesizing material that contain a lot of alumina silica. The purpose of this study is to find out the influence of composition variations and determine the feasibility of bentonite and palm shell ash as materials in the manufacture of geopolymer mortars. All materials are mashed and sifted, mixed, molded with a cube mold 5x5x5 cm³ and left for 24 hours. After that, the samples are dried at room temperature for 24 hours then heated using an oven at a temperature of 60 °C and 80 °C for 12 hours, after work some test were carried out (Physical Test, Mechanical Test, XRF, XRD, SEM). Based on the results of the study, the optimum results were obtained, i.e in sample I at heating temperature of 80 °C obtained an optimal compressive strength: 11.94 Mpa, density: 2.42 g/cm³, porosity: 8.43%, and absorption: 3.48%. The results of the XRF are 55.59% SiO₂, 9.45% Al₂O₃, and 8.22% Fe₂O₃ with dominant phases in the form of quartz, anorthite, magnetite, microcline intermediate and silimanite. The results of the Scanning Electron Microscopy (SEM) show that the surface is irregularly round and does not produce many pores, so it has the highest compressive strength value. As well the elements detected with EDS, i.e C, O, Na, Mg, Al, Si, K, Ca, Fe, and P and the elements that are most evenly distributed are the elements Si and Al.

Keyword: characterization, curing, composition, geopolymer, mortar.

**PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BENTONIT DAN ABU CANGKANG
SAWIT TERHADAP PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER**

Oleh

YUGO CHAMBIOSO

Skripsi

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

Pada

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



**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS LAMPUNG
2022**

Judul Skripsi : **PENGARUH VARIASI KOMPOSISI BENTONIT
DAN ABU CANGKANG SAWIT TERHADAP
PEMBUATAN MORTAR GEOPOLIMER**

Nama Mahasiswa : **Yugo Chambioso**

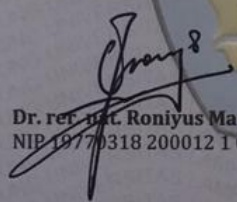
Nomor Pokok Mahasiswa : **1817041058**

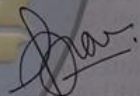
Jurusan : **Fisika**

Fakultas : **Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam**

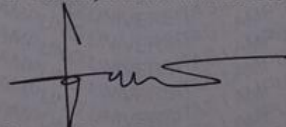


1. Komisi Pembimbing


Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.
NIP 19770318 200012 1 003


Ir. Suharto, M.T.
NIP 19660916 199403 1 001

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA


Gurum Ahmad Fauzi, S.Si., M.T.
NIP 19801010 200501 1 002

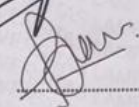
MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

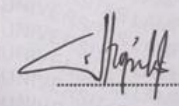
Ketua : Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si.



Sekretaris : Ir. Suharto, M.T.



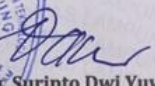
Penguji
Bukan Pembimbing : Suprihatin, S.Si., M.Si.



2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Dr. Eng. Suripto Dwi Yuwono, M.T.
NIP 19740705 200003 1 001



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 09 Juni 2022

PERNYATAAN

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

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

Bandar Lampung, 9 Juni 2022

Penulis,



Yugo Chambioso
NPM. 1817041058

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Yugo Chambioso, dilahirkan di Kota Bandar Lampung, Provinsi Lampung pada tanggal 2 Mei 1999. Penulis merupakan anak pertama dari pasangan Bapak Yuli Purwanto dan Ibu Sudarmi. Penulis menyelesaikan pendidikan di TK Xaverius Panjang, Bandar Lampung pada tahun 2005, SDN 1 Karang Maritim, Bandar Lampung pada tahun 2011, SMPN 23 Bandar Lampung pada tahun 2014, dan SMK SMTI Bandar Lampung pada tahun 2017. Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2018 melalui jalur penerimaan SBMPTN. Penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung, dengan judul “Purwarupa Sistem Layanan Informasi Laboratorium Fisika Elektronika Jurusan Fisika Universitas Lampung Berbasis *Website*”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program kuliah kerja nyata (KKN) Universitas Lampung tahun 2021 di Kecamatan Teluk Betung Barat, Kelurahan Bakung, Bandar Lampung. Dalam bidang organisasi penulis sebagai Kepala Bidang Minat dan Bakat HIMAFI FMIPA UNILA periode 2020.

MOTTO

لَا يُكَلِّفُ اللَّهُ نَفْسًا إِلَّا وُسْعَهَا

“Allah tidak membebani seseorang melainkan sesuai dengan kesanggupannya..”

[2:286]

“Hidup hanya tentang rasa “sabar” dan “syukur” tanpa tapi”.

(Yugo Chambioso)

PERSEMBAHAN

Dengan Penuh Rasa Syukur Kepada Allah Subhanahu wa ta'ala, karya ini dipersembahkan kepada :

Kedua Orang Tuaku

Bapak Yuli Purwanto & Ibu Sudarmi

Terimakasih untuk segala do'a dan usaha yang selalu diberikan demi kesuksesan putranya hingga mampu menyelesaikan pendidikan di tingkat Universitas sebagai Sarjana Fisika

Keluarga Besar & Teman-teman

Terimakasih atas segala dukungan yang telah diberikan sehingga dapat tetap bertahan dalam keadaan suka maupun duka

Almamater Tercinta

UNIVERSITAS LAMPUNG

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis haturkan kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia yang diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Komposisi Bentonit dan Abu Cangkang Sawit Terhadap Pembuatan Mortar Geopolimer”** yang merupakan syarat untuk meraih gelar Sarjana Sains (S.Si.) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung. Skripsi ini membahas tentang penggantian semen dalam pembuatan mortar geopolimer dari bahan baku yang bersumber dari alam. Pada skripsi ini dilakukan analisis dengan menggunakan uji massa jenis, porositas, absorpsi, uji kuat tekan, karakterisasi XRF, XRD, SEM-EDS.

Pada penulisan skripsi ini, penulis menyadari bahwa masih terdapat kekurangan baik dalam isi maupun cara penyajian. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran guna perbaikan di masa mendatang. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca umumnya. Aamiin.

Bandar Lampung, 9 Juni 2022

Yugo Chambioso

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberi hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Variasi Komposisi Bentonit dan Abu Cangkang Sawit Terhadap Pembuatan Mortar Geopolimer”**. Pada kesempatan ini dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada pihak-pihak yang turut membantu. Penulisan skripsi ini tidak dapat terwujud tanpa adanya bantuan dari berbagai pihak, baik berupa tenaga maupun pemikiran. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis haturkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. rer. nat. Roniyus Marjunus, M.Si. sebagai pembimbing utama dan selaku dosen pembimbing akademik yang tulus mengajari dan membantu penulis, membimbing, memberi pemahaman dan nasihat.
2. Bapak Ir. Suharto, M.T. sebagai pembimbing kedua yang senantiasa membantu penulis, membimbing, dan memberi pemahaman.
3. Bapak Muhammad Amin, S.T. sebagai pembimbing lapangan yang senantiasa memberi pemahaman, membimbing, dan membantu penulis.
4. Ibu Suprihatin, M.Si. sebagai dosen penguji yang telah memberi masukan dan koreksi dalam penyelesaian skripsi ini.

5. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
6. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi yuwono, M.T. selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.
7. Kedua orangtuaku, Bapak Yuli Purwanto dan Ibu Sudarmi, yang telah mendoa'kan serta memberikan semangat dan dukungan baik berupa materi ataupun moril kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
8. Kedua adikku Yudha Rimbawan dan Yustio Abimanyu yang telah mendoa'kan serta memberikan semangat dan dukungan kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
9. Teman-teman seperjuangan Anggi Purnomo, Clarissa August Taviko, Fahda Rufaidah Alawiyah, M. Irfan Pratama, Nur Isnaini Muna Firdausi, Putu Bagus Raditya, Ria Charoline Beru Ginting, dan Salwa Nabila Sausan yang telah membersamai, membantu, serta memberi semangat dan tempat bercerita keluh dan kesah.
10. Teman-teman diluar kampus: Diana Rosa, Firdania Annisa, Rahmania Erilya Putri, Ribka Paulina Manurung, Rio Arya Setiawan yang telah memberi semangat dan menjadi tempat bercerita keluh dan kesah.
11. EXDUTA, Exfis Futsal, Football Traveller Lampung, Minbak Family, dan PS PUJA yang telah menjadi tempat *healing* selama penelitian dan penyelesain skripsi ini.
12. Teman-teman Pimpinan HIMAFI periode 2020.

13. Seluruh mahasiswa/i jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung angkatan 2018, dan teman-teman yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu.

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

Bandar Lampung, 9 Juni 2022

Yugo Chambioso

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
HALAMAN JUDUL	iii
LEMBAR PENGESAHAN	v
PERNYATAAN	vi
RIWAYAT HIDUP	vii
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
I. PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	6
1.3 Tujuan Penelitian	7
1.4 Batasan Masalah	7
1.5 Manfaat Penelitian	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Geopolimer	9

2.2	Bentonit.....	11
2.3	Abu Cangkang Sawit	12
2.4	Air	13
2.5	<i>Superplasticizer</i>	14
2.6	<i>Sodium Silicate</i> (Na_2SiO_3)	15
2.7	Natrium Hidroksida (NaOH)	16
2.8	Sifat Fisis	17
2.8.1	Massa Jenis	17
2.8.2	Porositas	18
2.8.3	Absorpsi	18
2.8.4	Kuat Tekan.....	19
2.8	Karakterisasi	20
2.8.1	<i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	20
2.9.1	<i>X-Ray Diffraction</i> (XRD).....	21
2.9.3	<i>Scanning Electron Microscopy</i> (SEM)	23

III. METODE PENELITIAN

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	26
3.2	Alat dan Bahan.....	26
3.2.1	Alat penelitian.....	26
3.2.2	Bahan Penelitian	26
3.3	Prosedur Penelitian	27
3.3.1	Preparasi Sampel.....	27
3.3.2	Tahap Pembuatan Geopolimer.....	28
3.4	Diagram Alir	29

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1.	Hasil Uji Fisis Mortar Geopolimer	31
4.1.1	Hasil Pengujian Massa Jenis Mortar Geopolimer.....	31
4.1.2	Hasil Pengujian Porositas Mortar Geopolimer	34
4.1.3	Hasil Pengujian Absorpsi Mortar Geopolimer	35
4.2	Hasil Uji Mekanis Mortar Geopolimer	37
4.2.1	Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar Geopolimer	37
4.3	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF)	39
4.3.1	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Bentonit Dan Abu Cangkang Sawit.....	39
4.3.2	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) pada Mortar	40
4.4	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD)	41
4.4.1	Hasil Karakterisasi <i>X-Ray Diffraction</i> (XRD) pada Mortar	41
4.5	Hasil Karakterisasi <i>Scanning electron microscopy–Energy Dispersive Spectroscopy</i> (SEM-EDS).....	44

4.5.1 Hasil Karakterisasi (SEM-EDS) pada mortar	44
V. KESIMPULAN	
2.8 Kesimpulan	49
5.2 Saran	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN.....	57

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1. Reaksi geopolimer	10
Gambar 2.1. Alat uji kuat tekan.....	19
Gambar 2.2. Prinsip kerja XRF.....	21
Gambar 2.3. Skema difraksi Sinar-X.....	22
Gambar 2.4. Skematik hukum Bragg	22
Gambar 2.5. Skematik SEM.....	25
Gambar 3.1. Diagram alir	30
Gambar 4.1 Grafik massa jenis (ρ) pada suhu pemanasan 60 °C dan 80 °C.....	32
Gambar 4.2 Grafik porositas (P) pada suhu pemanasan 60 °C dan 80 °C	34
Gambar 4.3 Grafik absorpsi (A) pada suhu pemanasan 60 °C dan 80 °C	36
Gambar 4.4 Grafik kuat tekan (P) pada suhu pemanasan 60 °C dan 80 °C	37
Gambar 4.5. Difraktogram XRD Mortar komposisi I dengan suhu 80 °C.....	42
Gambar 4.6. Difraktogram XRD Mortar komposisi V dengan suhu 60 °C	43
Gambar 4.7. Penyebaran (<i>mapping</i>) unsur kimia mortar komposisi I pada suhu 80 °C	45
Gambar 4.8. Morfologi mortar komposisi I pada suhu 80 °C.....	46
Gambar 4.9. Penyebaran (<i>mapping</i>) unsur kimia mortar komposisi V pada suhu 60 °C	46

Gambar 4.10. Morfologi mortar komposisi V pada suhu 60 °C47

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 3.1. Komposisi pembuatan geopolimer	28
Tabel 4.1. Hasil Karakterisasi XRF Bahan Baku	40
Tabel 4.2. Hasil Karakterisasi XRF dan perhitungan pada mortar	40
Tabel 4.3. Fase XRD Mortar komposisi I dengan suhu 80 °C	42
Tabel 4.4. Fase XRD Mortar komposisi V dengan suhu 60 °C	44
Tabel 4.7. Komposisi unsur pada komposisi I menggunakan EDS	45
Tabel 4.8. Komposisi unsur pada komposisi V menggunakan EDS	47

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Meningkatnya kekhawatiran masyarakat tentang perlindungan sumber daya alam dan meminimalkan degradasi lingkungan telah mendorong masyarakat untuk mempertimbangkan alternatif bahan bangunan tradisional. Mortar berbasis semen Portland masa kini adalah bahan bangunan yang paling sering digunakan di dunia, dengan konsumsi semen tahunan 4 miliar ton dan tingkat pertumbuhan tahunan 4% (*Mineral Commodities Summary*, 2014). Masalah utama dengan semen Portland adalah pengolahan energi intensif dan yang lebih penting, konsentrasi besar karbon dioksida yang dipancarkannya ke atmosfer (Pavithra, 2016). Umumnya untuk setiap ton produksi semen Portland, melepaskan satu ton karbon dioksida (CO₂) di atmosfer (Davidovits, 1994).

Pancaran gas rumah kaca dari pembuatan semen Portland menghasilkan jumlah pertahunnya sekitar 1,35 miliar, atau keseluruhan yang dipancarkan dari gas rumah kaca kurang lebih 7% (Hardjito dkk, 2004). Hal tersebut mengakibatkan kerusakan lingkungan hidup salah satunya yaitu pemanasan global. Demikian pula pembuangan limbah industri seperti *fly ash*, limbah sisa industri pertambangan, lumpur merah, dan lainnya telah menjadi isu utama yang membutuhkan luas lahan yang dapat digunakan dan memiliki efek lingkungan yang signifikan. Akibatnya, perlu adanya penelitian lebih lanjut tentang pengelolaan limbah berkelanjutan dan

alternatif produk semen yang berbahaya bagi lingkungan. Dalam kondisi ini, geopolimer ditemukan menjadi salah satu opsi terbaik untuk mengurangi pemanasan global, karena dapat meminimalkan emisi CO₂ dari manufaktur semen hingga 80% (Pavithra, 2016).

Geopolimer adalah bahan aman yang tidak hanya secara efisien memanfaatkan limbah industri seperti *fly ash*, tetapi juga berfungsi sebagai alternatif yang lebih aman untuk beton semen Portland biasa (McLellan dkk, 2011). Geopolimer adalah inovasi terbaru dalam manufaktur beton di seluruh dunia, di mana semen Portland konvensional seluruhnya diganti dengan bahan aluminosilikat yang diaktivasi oleh larutan alkali kuat untuk berfungsi sebagai pengikat (Patankar dkk, 2013). Metakaolin, *fly ash*, lumpur merah, limbah pertanian dan limbah tambang adalah contoh produk alami dan industri yang dapat digunakan untuk membuat pengikat geopolimer (Slaty dkk, 2013). 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 (Part dkk, 2015).

Pada penelitian ini bahan pengikat yang digunakan dalam campuran pembuatan geopolimer yaitu bentonit dan abu cangkang sawit. Pengikat geopolimer

menguntungkan dalam hal menggunakan limbah industri dan perkebunan sebagai bahan dasar, tetapi varian dalam komposisi kimia, fase kristal, dan sumber material akan mempengaruhi kekuatan bahan-bahan ini pada akhirnya. Satu jenis bahan dasar dapat digunakan dalam pembuatan geopolimer, selain itu geopolimer juga dapat dibuat dari dua atau tiga jenis bahan, seperti paduan *fly ash* dan abu cangkang sawit (Mohd Ariffin dkk, 2011), *fly ash* dengan *bottom ash* (Yofani dkk, 2021), *slag* dengan abu cangkang sawit (Yusuf, 2014), dan *fly ash* dengan bentonit (Rout, 2020).

Bentonit menunjukkan sifat pozzolan untuk meningkatkan kekuatan tekan semen Portland biasa. Bentonit berkualitas rendah adalah salah satu jenis tanah liat aluminosilikat yang murah dan tersebar luas (Buchwald dkk, 2009). Dalam dunia komersial, istilah "bentonit" mengacu pada tanah lempung yang mengandung lebih dari 80% montmorillonit (Widihati, 2012). Montmorillonit sebagai komponen utama bentonit, dapat digunakan untuk menyiapkan geopolimer dalam lingkungan alkali, yang menunjukkan bahwa antarmuka antara geopolimer dan bentonit dapat ditingkatkan serta menghasilkan hasil mekanik yang baik (Calabria-Holley dkk, 2017). Bentonit dapat membentuk partikel aluminosilikat yang sangat halus dengan struktur berlapis. Beberapa partikel halus dapat larut dan memiliki potensi polimerisasi ketika mereka kontak dengan larutan alkali pH tinggi (Hu dkk, 2009).

Sangat penting untuk mempertimbangkan penggunaan limbah pertanian, perkebunan, dan kehutanan karena limbah ini memiliki nilai ekonomi yang signifikan ketika dieksploitasi dan diproses menjadi produk yang lebih bermanfaat. Akibatnya, sangat disesalkan jika limbah ini tidak ditangani dan berakhir sebagai

bahan pencemar di lingkungan (Zumaro, 2017). Satu diantara dari banyak limbah pertanian atau perkebunan yang ditemukan di alam dalam jumlah besar adalah limbah kelapa sawit. Hingga masa kini, limbah ini belum digunakan secara efisien, dan nilai ekonominya cukup rendah. Cangkang sawit sebagai buangan pembuatan minyak sawit merupakan salah satu bahan yang dimaksud (Revi, 2020). Komponen utama abu cangkang sawit adalah silika dioksida (SiO_2), yang memiliki karakteristik reaktif dan aktivitas pozzolanik yang tinggi, memungkinkannya bereaksi sebagai material yang kaku dan keras. Bahan pozzolanik adalah bahan yang banyak memiliki unsur silika (SiO_2), salah satunya berasal dari limbah abu sawit (Graille, dkk 1985). Limbah abu sawit yang dimaksud adalah *slag* sisa pembakaran pada boiler, yang mengalami *melting* sehingga terjadi pengerasan seperti batu karang, *slag* didapat setelah boiler mengalami *overhole*.

Sebelumnya juga telah dilaksanakan penelitian mengenai penggunaan limbah abu sawit sebagai binder geopolimer yang dilakukan Islami dkk (2015). Variasi komposisi yang digunakan diantaranya *fly ash* : abu sawit yaitu 100 : 0, 75 : 25, 50 : 50, 25 : 75 dicetak dengan ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dan menggunakan suhu pemanasan 110°C serta dibiarkan hingga umur 7 dan 28 hari. Larutan aktivator yang digunakan NaOH 14 M. Hasil kuat tekan menunjukkan bahwa mortar meningkat sesuai dengan peningkatan suhu perawatan, dosis aktivator, dan modulus aktivator. Kuat tekan mortar yang dihasilkan dipengaruhi oleh pengolahan abu dan *rest period*. Kuat tekan maksimum didapatkan pada binder abu terbang dan abu sawit dengan rasio 75 : 25 yaitu sebesar 20 MPa. Selain itu Mohd Ariffin dkk (2011). Telah melakukan pengujian dengan variasi *fly ash* : abu sawit dari 0 : 100, 30 : 70, 50 : 50 dan 70 : 30. Konsentrasi larutan alkali yang digunakan adalah 14 M dan 8 M.

Pengujian dilakukan pada benda uji beton geopolimer kubus dengan ukuran $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$. Spesimen dikeringkan pada suhu kamar dan pengawetan panas pada suhu $60 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $90 \text{ }^\circ\text{C}$ masing-masing selama 24 jam. Spesimen yang diawetkan pada suhu kamar diuji setelah pada hari ke 7, 14 dan 28. Hasil dari pengujian ini menyatakan bahwa kuat tekan terbesar 25 MPa dicapai di rasio abu variasi komposisi 70% : 30% (*fly ash* : abu sawit). Beton geopolimer memberikan nilai kuat tekan yang lebih besar pada suhu tinggi. Hal ini disebabkan proses polimerisasi lengkap selama *heat curing* pada suhu tinggi (Mohd Ariffin dkk, 2011).

Literatur terakhir, mengenai kuat tekan dan struktur mikro dari campuran pasta binder *slag* dan abu sawit yang diaktivasi alkali. Rasio yang digunakan bermacam-macam dari 0, 0,05, 0,1, 0,15, 0,2, 0,25 dan 0,3, dicetak dengan ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ serta diawetkan pada suhu kamar kemudian diuji setelah 3, 14, 28 hari. Hasil nilai kuat tekan maksimum didapatkan dalam penambahan 0,2 dengan masa penyimpanan selama 28 hari sebesar 44,57 MPa. Hal ini *slag* sangat berkontribusi signifikan terhadap kekuatan mekanik dengan efek pengisian pori, dan pembentukan tambahan kalsium aluminat silika hidrat (CSH) (Yusuf, 2014).

Berdasarkan studi literatur di atas, dilakukan penelitian pembuatan mortar geopolimer menggunakan bahan utama bentonit dan abu cangkang. Penelitian ini dilakukan dengan campuran larutan alkali yaitu NaOH dan Na_2SiO_3 kemudian dicetak berbentuk kubus dengan ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ dan dikeringkan pada suhu pengeringan $60 \text{ }^\circ\text{C}$ dan $80 \text{ }^\circ\text{C}$ selama 12 jam. Menurut Duxson, dkk (2007) untuk mendapat hasil geopolimer yang mendekati sempurna dan proses geopolimerisasi yang lebih cepat geopolimer dipanaskan pada suhu berkisar antara $60 \text{ }^\circ\text{C}$ sampai

90 °C. Selanjutnya dilakukan uji fisis dan mekanis yaitu uji massa jenis (pengukuran massa setiap satuan volume benda), uji porositas (persentase dari ruang kosong beton terhadap volume benda), uji absorpsi (menentukan besarnya persentase air yang diserap oleh suatu bahan), uji kuat tekan (kemampuan beton untuk menahan tekanan). Karakterisasi yang dilakukan yaitu *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* (SEM) untuk mengetahui morfologi dari permukaan mortar.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi bentonit dan abu cangkang sawit terhadap sifat fisis (massa jenis, porositas, absorpsi) dan mekanis (kuat tekan) pada mortar geopolimer?
2. Bagaimana komposisi kimia yang dihasilkan pada mortar geopolimer menggunakan karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF)?
3. Bagaimana fase yang terjadi pada mortar geopolimer menggunakan karakterisasi *X-Ray Diffraction* (XRD)?
4. Bagaimana struktur mikro yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan karakterisasi *Scanning Electron Microscopy* (SEM)?
5. Apakah bentonit dan abu cangkang sawit dapat digunakan sebagai bahan pembuatan mortar geopolimer?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui sifat fisis dan mekanis akibat pengaruh variasi komposisi bentonit dan abu cangkang sawit mortar geopolimer?
2. Mengetahui komposisi kimia yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF)?
3. Mengetahui fase yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD)?
4. Mengetahui morfologi yang terbentuk pada mortar geopolimer menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)?
5. Mengetahui bentonit dan abu cangkang sawit dapat digunakan sebagai bahan pembuatan mortar geopolimer?

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bentonit yang digunakan berasal dari Jawa Tengah.
2. Limbah abu cangkang sawit yang digunakan berasal dari PTPN VII, Bekri, Lampung Tengah.
3. Ukuran benda uji beton yaitu $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$.
4. Suhu pengeringan sebesar 60°C dan 80°C selama 12 jam.
5. Uji fisis dan mekanis yang dilakukan seperti massa jenis, porositas, absorpsi dan kuat tekan.
6. Karakterisasi yang digunakan antara lain XRF, XRD, SEM.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh bentonit dan abu cangkang dalam pembuatan mortar geopolimer.
2. Memberikan pengetahuan baru terhadap perkembangan IPTEK khususnya dalam pembuatan geopolimer.
3. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi mengenai pemanfaatan bentonit dan abu cangkang sawit sebagai alternatif dalam pembuatan mortar geopolimer.
4. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Unila di bidang Fisika Material.

II. TINJAUAN PUSTAKA

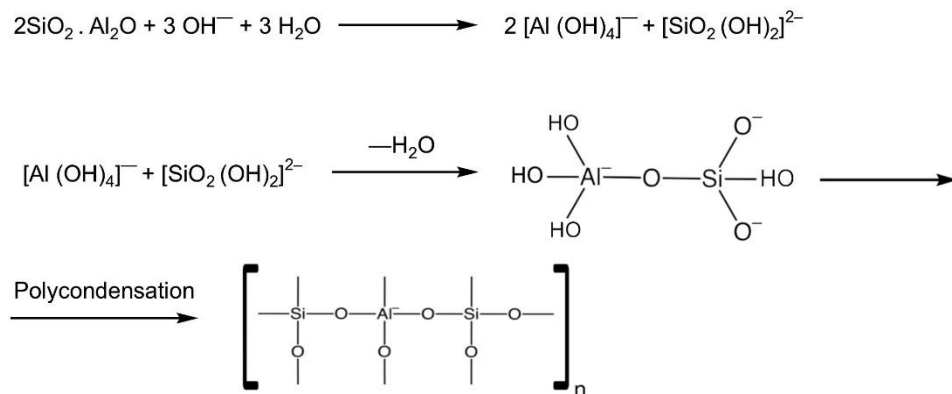
2.1. Geopolimer

Geopolimer adalah polimer anorganik yang telah digunakan dalam konstruksi sipil sejak 1980-an sebagai alternatif untuk semen Portland. Bahan aluminosilikat, yang mengandung silika dan alumina, digunakan untuk membuat geopolimer. Di Indonesia, bahan baku aluminosilikat seperti kaolin dan *fly ash* banyak tersedia. Inilah sebabnya mengapa potensi Indonesia untuk pertumbuhan geopolimer sangat besar, terutama bila dikaitkan dengan komitmen negara untuk mengurangi emisi karbon nasional sebesar 26% pada tahun 2020 sesuai dengan kerangka kerja UNFCCC (Hilman, 2010).

Davidovits (1994) mengemukakan istilah kata "geopolimer" pada 1970-an untuk menggambarkan bahan padat yang memiliki komposisi kimia yang mirip dengan zeolit tetapi secara struktural terdiri dari rantai makromolekul yang terdiri dari atom silika, aluminium, dan oksigen (Davidovits, 1994). Zat yang banyak mengandung silika dan aluminium adalah bahan dasar untuk memproduksi beton geopolimer. Komponen-komponen ini dapat ditemukan dalam bahan limbah industri seperti *fly ash* yang tersisa setelah pembakaran batubara. Ketika bahan geopolimer ini dicampur dengan agregat batuan, beton geopolimer dibuat tanpa perlu semen.

Tanah liat, terak, *silica fume*, dan *fly ash* adalah contoh prekursor silikat alkali, sedangkan larutan natrium silikat dan larutan kalium silikat adalah contoh larutan silikat alkali yang digunakan dalam sintesis geopolimer aluminosilikat (Karimah dan Prasajo, 2019).

Silika (Si) dan Aluminium (Al) memainkan peran kunci dalam ikatan polimerisasi. Rangkaian panjang AlO_4 dan SiO_4 akan dihasilkan dari reaksi Aluminium (Al) dan Silika (Si) di bahan dasar dengan larutan alkali. Karena sifat fisik beton geopolimer memadat dengan cepat, sehingga kuat tekan dapat dicapai pada umur awal setelah beton tersebut di cetak (Davidovits 1994b). 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 (Davidovits, 1994a). Reaksi geopolimerisasi dapat dilihat pada Gambar 1.1 di bawah ini.



Gambar 1.1 Reaksi geopolimerisasi (Duxson dkk, 2007).

2.2. Bentonit

Tanah lempung diklasifikasikan sebagai bentonit (smektit), kaolinit, haloisit, klorit, dan illit tergantung pada konsentrasi mineral yang terkandung. Dalam dunia komersial, istilah "bentonit" mengacu pada tanah lempung yang mengandung lebih dari 80% montmorillonit. Montmorillonit adalah mineral tanah lempung yang memiliki penyebaran terluas dan unik karena dapat mengembang (*swelling*), memiliki kapasitas pertukaran kation yang tinggi, dan dapat diinterkalasi. Karena sifat yang unik, montmorillonit (yang ditemukan dalam bentonit) dapat diubah untuk menghasilkan produk senyawa silikat alumina dengan kualitas fisik dan kimia yang lebih baik (Widihati, 2012).

Bentonit adalah salah satu contoh lempung yang banyak ditemukan di alam (Abderrazek dkk, 2006). Bentonit memiliki rumus kimia $[(OH)_4Si_8Al_4O_{20}.n H_2O]$ (Hao dkk, 2014). Bentonit biasanya dimanfaatkan sebagai adsorben (Santos dkk, 2016) dan katalis (Li dkk, 2015). Namun, ada beberapa kelemahan dalam penggunaan bentonit. Kelemahan dari bentonit yaitu memiliki jarak antar lapisan sangat kecil. Hal ini karena keberadaan ion penukar kecil dalam bentonit, yang menghasilkan jarak sempit antara lapisan, sehingga tidak efektif sebagai adsorben dan katalis (Goodarzi dkk, 2016).

Bentonit adalah penukar kation yang terdiri dari kerangka aluminosilikat yang menciptakan struktur lapisan dan memiliki muatan negatif yang sama di permukaannya. Ketika diraba, bentonit seperti lilin dan memiliki tekstur seperti sabun. Serpihan dekat permukaan berwarna abu-abu pada awalnya tetapi mencerahkan saat mengering. Endapan bawah permukaan berwarna abu-abu

kebiruan, dengan beberapa putih, coklat muda, dan coklat kemerahan (Nurhayati, 2010).

2.3. Abu Cangkang Sawit

Limbah padat dari produksi minyak sawit termasuk serat, cangkang, dan tandan kosong. 20 ton cangkang, 7 ton serat, dan 25 ton tandan kosong dihasilkan dari 100 ton tandan buah segar yang di produksi dari proses ekstraksi. Abu cangkang sawit adalah zat halus yang memiliki kandungan silika dan alumina yang dapat bereaksi untuk menghasilkan material semen (Kusuma, 2015). Produk sampingan seperti abu kerak boiler yang beratnya kurang lebih 3 hingga 5 ton per minggu dihasilkan dari pembakaran limbah sawit (Mulia, 2007). Abu Cangkang Kelapa Sawit merupakan bahan pozzolanik, yaitu material yang tidak mengikat seperti semen, namun mengandung senyawa silika oksida (SiO_2) (Graille, dkk 1985). Abu cangkang sawit mempunyai kadar silika 59,1% berat (Zahrina dkk, 2007)

Abu cangkang sawit didapati dari proses pembakaran pada pembangkit listrik tenaga uap menggunakan bahan bakar limbah cangkang kelapa sawit pada suhu mulai dari 800 °C hingga 1.000 °C (Tangchirapat, 2009). Abu cangkang sawit mencakup sejumlah besar silika dioksida dan dapat digunakan sebagai alternatif semen karena abu cangkang sawit salah satu bahan pozzolanik yang dapat ditemukan di sebagian besar dunia (Tangchirapat, 2009). Abu cangkang sawit bisa digunakan secara efektif untuk mengurangi penggunaan semen dan volume limbah, yang baik untuk menjaga kelestarian lingkungan (Tangchirapat, 2009).

2.4. Air

Pembuatan beton akan lebih mudah jika menggunakan air dalam proses produksinya, selain itu air dibutuhkan guna untuk melembabkan agregat serta dalam proses kimia semen. Dalam pembuatan beton air yang dapat di konsumsi dapat juga digunakan sebagai campuran beton. Ketika air yang mengandung komponen berbahaya seperti bahan kimia, minyak, air garam atau gula, ketika digunakan dalam campuran pembuatan beton, dapat menghasilkan karakteristik beton yang dapat berubah bahkan kualitas beton tersebut dapat menurun. Karena pasta semen adalah produk dari reaksi kimia antara air dan semen, itu bukan jumlah keseluruhan air yang dibandingkan dengan volume keseluruhan campuran yang penting, akan tetapi jumlah air yang dibandingkan dengan semen, juga dikenal sebagai Faktor Air Semen (FAS). Ketika proses hidrasi selesai akan dihasilkan gelembung air akibat penggunaan air yang berlebihan, sementara itu kualitas kekuatan beton dapat dipengaruhi karena proses hidrasi yang tidak selesai sepenuhnya akibat penggunaan air yang terlalu sedikit (Nurmaidah, 2015).

Menurut Ramadhan (2011) Air tawar (air dari sumur, sungai, kolam, danau, dan sumber lainnya), air limbah, dan air laut yang melewati standar kualitas semuanya dapat digunakan. Kehadiran air dalam campuran beton akan berdampak pada hal-hal berikut (Darma dkk, 2013):

1. Sifat kemampuan kerja campuran beton.
2. Nilai susut beton yang dihasilkan.
3. Proses reaksi yang berlangsung dengan semen Portland.
4. Perawatan campuran beton untuk menjamin pengerasan yang baik.
5. Pengerasan beton yang baik akibat dari perawatan campuran beton.

2.5. Superlasticizer

Superplasticizer adalah sejenis peredam air. Namun, perbedaan antara *superplasticizer* dan *water reducer* adalah *superplasticizer* secara signifikan akan mengurangi kebutuhan air untuk pencampuran beton. Secara umum, ada empat kategori utama dari *superplasticizer*, tersulfonasi melaminformaldehida kondensat, tersulfonasi naftalenakondensa formaldehida, lignosulfonat termodifikasi dan lain-lain seperti ester asam sulfonat dan ester karbohidrat. Pengaruh *superplasticizer* sudah jelas yaitu menciptakan beton dengan kemampuan kerja yang sangat tinggi atau beton dengan kekuatan yang sangat besar. Mekanisme *superplasticizer* adalah dengan memberikan muatan negatif yang tinggi pada partikel semen sehingga saling tolak menolak muatan elektrostatis yang sama. Dengan mendeflokulasi partikel semen, lebih banyak air disediakan untuk pencampuran beton. Untuk pemakaian umum, dosis *superplasticizer* antara 1-3/m³. Namun, dosisnya dapat ditingkatkan hingga setinggi 5-20/m³. Karena konsentrasi *superplasticizer* berbeda, perbandingan kinerja harus dibuat berdasarkan jumlah padatan, dan bukan massa total. Efektivitas *superplasticizer* yang diberikan tergantung pada rasio air/semen. Efektivitas meningkat saat w/c menurun. Kompatibilitas dengan semen sebenarnya adalah salah satu parameter terpenting yang perlu dipertimbangkan, dan tidak disarankan semen dan *superplasticizer* memenuhi standar secara terpisah (Alsadey, 2015).

Beberapa keuntungan yang didapat ketika menggunakan *superplasticizer*: menghasilkan beton dengan kemampuan kerja tinggi dengan kandungan dan kekuatan semen yang konstan, dengan tujuan agar mudah ditempatkan dan dipadatkan, memproduksi beton dengan kemampuan kerja normal, tetapi

kebutuhan air lebih rendah, produksi beton dengan kombinasi kemampuan kerja tinggi dan kadar air rendah, dan merancang beton dengan kekuatan normal dan kemampuan kerja dengan kandungan semen yang lebih sedikit. Penggunaan *superplasticizer* menjadi terkenal saat ini karena memiliki keunggulan baik untuk beton segar maupun beton keras. Pemanfaatan *superplasticizer* akan berdampak positif terhadap sifat beton, baik dalam keadaan segar maupun mengeras. Jika perbandingan air/semen dijaga, ada kecenderungan *superplasticizer* akan memperpanjang waktu pemasangan beton karena lebih banyak air tersedia untuk melumasi campuran. Pada beton yang diperkeras penggunaan *superplasticizer* akan meningkatkan kuat tekan dengan meningkatkan efektifitas pemadatan untuk menghasilkan beton yang lebih padat. Risiko susut pengeringan akan dikurangi dengan menahan beton dalam bentuk cair untuk periode waktu yang cukup lama. Selain itu, laju karbonasi menjadi sangat lambat ketika rasio air/semen diturunkan dengan adanya *superplasticizer* (Yamakawa dkk, 1990).

2.6. Sodium Silicate (Na_2SiO_3)

Natrium silikat (Na_2SiO_3), sering dikenal sebagai *waterglass*, adalah kristal putih yang dapat larut dalam air (*soluble glass*) untuk menghasilkan larutan alkali. *Sodium orthosilicate*, *sodium coplicate*, dan *sodium pyrosilicate* adalah semua contoh *sodium silicate*. 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). Karena membantu mempercepat reaksi polimerisasi, Na_2SiO_3 merupakan komponen penting dalam produksi beton geopolimer (Manuahe dkk, 2014). Efek Na_2SiO_3 pada beton

geopolimer adalah meningkatkan kemampuan kerja (*workability*) dan memberikan kuat tekan yang baik. Semakin besar jumlah Na_2SiO_3 , semakin tinggi viskositas dan semakin cepat proses produksi pengikat. Selain itu, meningkatkan jumlah Na_2SiO_3 dalam campuran beton geopolimer meningkatkan jumlah SiO_2 yang mempengaruhi kuat tekan beton (Sengkey dkk, 2020).

2.7. Natrium Hidroksida (NaOH)

Natrium hidroksida (NaOH) atau dikenal sebagai soda api atau soda kaustik yang merupakan sejenis dari basa logam kaustik. NaOH digunakan sebagai dasar dalam pembuatan *pulp* kayu dan kertas, deterjen, air minum, tekstil, dan sabun di berbagai bidang industri. Pada umumnya larutan NaOH yang memiliki sifat basa kuat digunakan dalam reaksi dengan asam lemah, seperti natrium karbonat, di mana asam lemah tidak efisien. Terlepas dari kenyataan bahwa NaOH tidak dapat terbakar melalui reaksi dengan logam amfoter seperti aluminium, timbal, dan seng menghasilkan gas nitrogen yang dapat menciptakan ledakan. 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 (Hardjito dkk, 2005; 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.

2.8. Sifat Fisis

Pengujian dilakukan pada suatu material untuk menentukan kualitas fisisnya.

Berikut pengujian fisis diantaranya:

2.8.1 Massa Jenis

Rasio volume material pada suhu terhadap berat air dengan volume yang sama pada suhu tersebut dikenal sebagai massa jenis (Laoli dkk, 2013). Massa jenis adalah properti fisik yang menggambarkan kepadatan pengikatan bahan bangunan material. Jenis dan kuantitas mineral, porositas, dan rongga pengisi cairan semuanya mempengaruhi tingkat massa jenis material (Darminto dan Ridha, 2016). Jika suatu material mempunyai nilai massa jenis yang besar maka molekul penyusunnya semakin rapat (Giancoli, 2005). Nilai uji massa jenis dapat diketahui seperti tampak pada persamaan (2.1).

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

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).

2.8.2 Porositas

Persentase ruang kosong atau pori-pori dalam beton dibandingkan dengan total volume beton dikenal sebagai porositas (Tumingan dkk, 2016). Rasio volume pori terhadap volume keseluruhan beton dapat didefinisikan sebagai porositas. Pori-pori dalam beton paling sering disebabkan oleh kesalahan dalam proses pengecoran,

seperti variabel air semen yang mempengaruhi keterikatan antara pasta semen dan agregat, ukuran nilai *slump*, jenis pengaturan gradasi agregat gabungan yang dipilih, dan waktu pemadatan. Semakin besar kepadatan beton, semakin baik nilai kuat tekan beton, sedangkan semakin besar porositas beton, maka semakin lemah kuat tekan beton (Nurwidyanto dkk, 2006). Nilai uji porositas dapat diketahui seperti tampak 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),

2.8.3 Absorpsi

Jumlah air yang diserap oleh benda uji mortar dikenal sebagai absorpsi. Pori-pori atau rongga dalam mortar memiliki dampak yang signifikan pada jumlah air yang diserapnya. Semakin banyak pori-pori dalam mortar, semakin besar penyerapan dan dengan demikian semakin rendah ketahanannya. Rongga atau pori-pori dalam bentuk mortar sebagai akibat dari kualitas dan komposisi bahan penyusun yang buruk (Nurwidyanto dkk, 2006). Nilai absorpsi dapat diketahui seperti tampak pada Persamaan (2.3).

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

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

2.8.4 Kuat Tekan

Kemampuan beton untuk menerima gaya tekan persatuan luas dikenal sebagai kekuatan tekan. Semakin tinggi kekuatan struktur yang diinginkan, semakin baik kualitas beton yang diciptakan. SNI 03-6805-2002 dan ASTM C39/C39M-04a digunakan sebagai standar pengujian kuat tekan (Swardika dkk, 2019). Nilai kuat tekan dapat dihitung seperti tampak pada persamaan (2.3).

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.3)$$

dimana P merupakan kuat tekan (MPa), F sebagai beban maksimum (N), A sebagai luas bidang sampel (mm^2).

Tata cara perhitungan kuat tekan beton di atas adalah berdasarkan ASTM 39 atau SNI 03- 1974-1990. Alat uji kuat tekan dapat dilihat seperti tampak pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Alat Uji Kuat Tekan (Sumber: Pusat Riset Teknologi Pertambangan-BRIN).

2.9. Karakterisasi

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

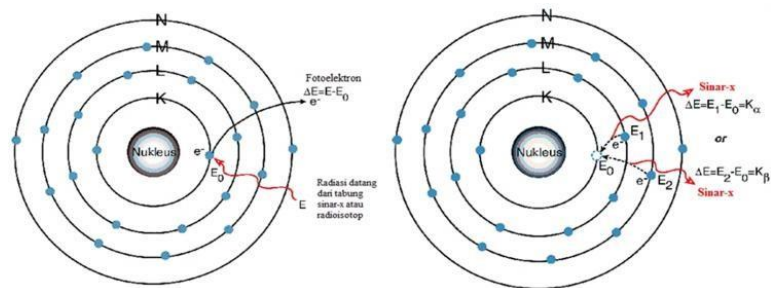
2.9.1 X-Ray Fluorescence (XRF)

Teknik analisis bahan yang menggunakan peralatan spektrometer yang dipancarkan oleh sampel dari radiasi sinar-X dikenal sebagai analisis *X-Ray Fluorescence* (XRF). Sampel padat, cair, dan bubuk semuanya dapat dianalisis.

Penentuan komposisi kualitatif dan kuantitatif elemen dalam bahan digunakan alat uji yaitu spektrometer XRF. Keberadaan spektrum elemen dalam energi sinar-X yang khas menunjukkan jenis elemen yang terkandung dalam materi yang dianalisis dalam analisis kualitatif. Sementara informasi tentang jumlah elemen yang ada dalam suatu bahan seperti yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum dari analisis kuantitatif, sedangkan analisis kualitatif memberikan informasi tentang jumlah elemen yang ada dalam materi seperti yang ditunjukkan oleh ketinggian puncak spektrum (Jamaludin dan Adiantoro, 2012).

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). Apabila 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. 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. Sinar-X yang dihasilkan merupakan gabungan spektrum sinambung dan spektrum berenergi tertentu (*discreet*) yang

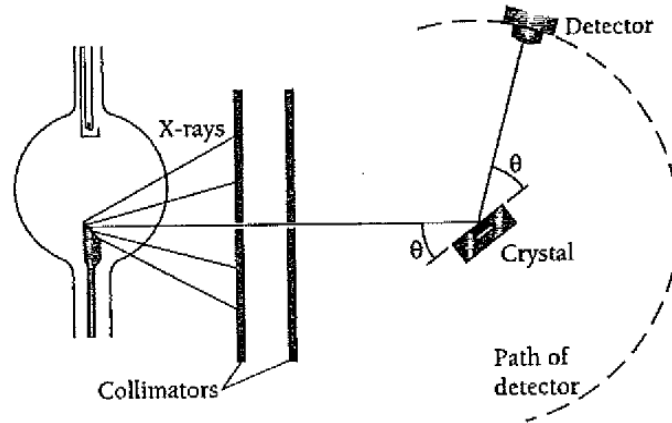
berasal dari bahan sasaran yang tertumbuk elektron. Jenis spektrum *discreet* yang terjadi tergantung pada perpindahan elektron yang terjadi dalam atom bahan. Spektrum ini dikenal sebagai spektrum sinar-X karakteristik. Peristiwa ini dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Prinsip Kerja XRF (Kalnicky, 2001).

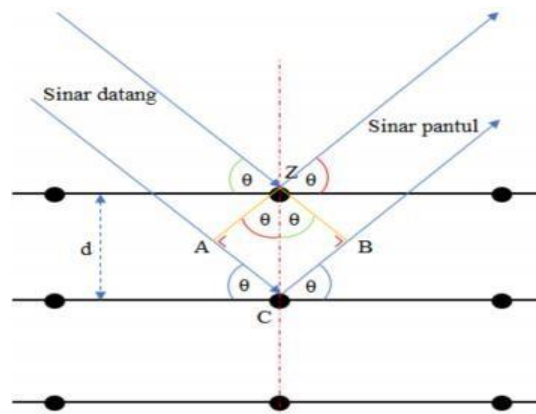
2.9.2 X-Ray Diffraction (XRD)

X-Ray Diffraction (XRD) adalah sebuah alat yang digunakan untuk memeriksa struktur kristal dari suatu bahan, dengan metode analisis data untuk mengetahui jenis dan sifat mineral tertentu agar terlihat pola difraksi mineral yang dihasilkan (Oktamuliani dkk, 2015). Penyebab utama yang menghasilkan bentuk pola-pola difraksi yaitu ukuran dari setiap selnya, nomor atom dan posisi atom-atom di dalam sel. Analisis difraksi sinar-X dalam padatan kristalin memegang peranan penting untuk mengetahui parameter kisi dan tipe struktur. Selain itu, dimanfaatkan juga untuk mempelajari cacat pada kristal individu dengan mendeteksi perbedaan intensitas difraksi di daerah kristal yang mendekati dislokasi dan daerah kristal yang mendekati kesempurnaan (Smallman dan Bishop, 2000). Skema difraksi sinar-X ditampilkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3. Skema difraksi sinar-X.

Gambar 2.3. menunjukkan skema sinar-X yang menembak sampel padatan kristalin, kemudian mendifraksikan sinar-X ke segala arah dengan berdasarkan Hukum Bragg. Detektor bergerak dengan kecepatan sudut yang konstan untuk mendeteksi berkas sinar-X yang didifraksikan oleh sampel. Sinar yang sefase akan saling menguatkan dan yang tidak sefase akan saling meniadakan atau melemahkan. Berkas sinar sefase tersebut yang menghasilkan puncak difraksi. Besar sudut difraksi tergantung pada panjang gelombang (λ) berkas sinar-X dan jarak antar bidang penghamburan (d). Skema hukum Bragg dapat dilihat pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4. Skema hukum Bragg.

Gambar 2.4 menunjukkan seberkas sinar mengenai atom A pada bidang pertama dan B pada bidang berikutnya. Jarak antara bidang A dengan bidang B adalah d , sedangkan θ adalah sudut difraksi. Berkas-berkas tersebut mempunyai panjang gelombang λ , dan jatuh pada bidang kristal dengan jarak d dan sudut θ . Agar mengalami interferensi konstruktif, kedua berkas tersebut harus memiliki beda jarak $n\lambda$. Sedangkan beda jarak lintasan kedua berkas adalah $2d \sin \theta$. Interferensi konstruktif terjadi jika beda jalan sinar adalah kelipatan bulat panjang gelombang λ , sehingga dapat dituliskan Persamaan (2.11).

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.11)$$

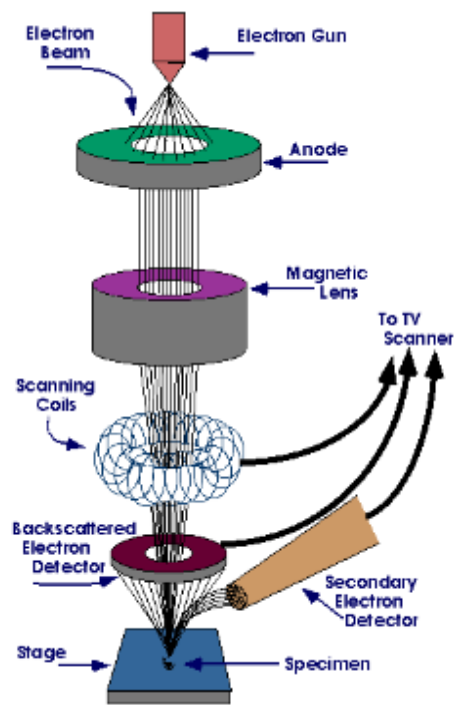
Pernyataan ini adalah Hukum Bragg. Pemantulan Bragg dapat terjadi jika $\lambda \leq 2d$, karena itu tidak dapat menggunakan cahaya kasat mata, dengan n adalah bilangan bulat = 1, 2, 3, dan seterusnya sampai n (Beiser, 2003).

2.9.3 Scanning Electron Microscopy (SEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) adalah alat canggih serbaguna yang sebagian besar digunakan untuk mempelajari fenomena permukaan material. Pemindaian mikroskop elektron (SEM), sering dikenal sebagai analisis SEM atau metodologi SEM, adalah metode untuk menganalisis bahan organik dan anorganik pada skala nano hingga mikrometer (μm) skala yang telah digunakan di berbagai bidang di seluruh dunia. SEM memberikan gambar yang sangat tepat dari berbagai bahan pada pembesaran tinggi hingga 300.000x dan bahkan 1.000.000x (dalam beberapa model kontemporer). SEM dapat mengungkapkan rincian dan seluk-beluk yang tidak dapat dilihat oleh mikroskop cahaya (Mohammed dan Abdullah, 2018).

Elektron berenergi tinggi digunakan untuk menembak sampel di SEM, dan sinar-X yang keluar dianalisis. Sinar-X yang keluar memberikan informasi tentang topografi dan morfologi material. Topografi mengacu pada karakteristik permukaan objek seperti tekstur, kehalusan, dan kekasaran, sedangkan morfologi mengacu pada bentuk dan ukurannya. SEM adalah instrumen kuat yang dapat digunakan untuk mengkarakterisasi kristalografi sampel, magnetik, dan listrik dan untuk menentukan apakah ada perubahan morfologi partikel telah terjadi setelah memodifikasi permukaan sampel dengan molekul lain, meskipun fakta bahwa itu hanya memvisualisasikan gambar permukaan material dan tidak memberikan informasi internal. Dengan demikian, SEM merupakan alat multiguna yang dapat mengkaji dan menganalisis material dengan resolusi tinggi (Akhtar dkk, 2018).

SEM dimulai dengan aliran elektron yang ditembakkan dari pistol elektron yang dilengkapi dengan katoda filamen tungsten dan katoda filamen. Tungsten sering digunakan dalam senjata elektron karena memiliki titik leleh terbesar dan tekanan uap terendah dari logam apa pun, membuatnya paling mungkin untuk dipanaskan untuk emisi elektron sementara masih relatif terjangkau. Satu atau dua lensa kondensor memusatkan berkas elektron ke titik dengan diameter 0,4 nm hingga 5 nm. Balok kemudian ditekuk pada sumbu x dan y oleh sepasang kumparan pemindai atau pelat deflektor di kolom elektron, yang biasanya diposisikan di lensa akhir, memungkinkannya untuk dipindai dalam mode raster di atas wilayah persegi panjang dari permukaan spesimen. Ketika berkas elektron utama berinteraksi dengan spesimen, elektron kehilangan energi karena hamburan acak berulang dan penyerapan dari spesimen, yang membentang dari kurang dari 100 nm hingga kira-kira 5 μm ke permukaan (Sudrajat dan A.P Bayuseno, 2014).



Gambar 2.5 Skema SEM (Sudrajat dan A.P Bayuseno, 2014).

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada tanggal 20 Desember 2021 sampai dengan 21 Februari 2022 di Pusat Riset Teknologi Pertambangan (PRTP–BRIN).

3.2 Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu timbangan digital, oven, cetakan kubus ukuran $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$, ember, beaker gelas, gelas ukur, mesin uji kuat tekan *Computer Universal Testing Machines* Type HT-2402, *X-Ray Fluorescence (XRF) PanAnalytical Type minipal 4*, *X-Ray Diffraction (XRD) PanAnalytical tipe expertpro*, *Scanning Electron Microscopy (SEM)*.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu, bentonit dari Jawa Tengah, Abu cangkang sawit dari PTPN VII, Bekri, Lampung Tengah, NaOH 15 M, Na_2SiO_3 , *superplasticizer*, air dan serat.

3.3 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini terdiri dari preparasi sampel dan pembentukan geopolimer.

3.3.1 Preparasi Sampel

Tahapan preparasi sampel pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bentonit ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi dengan ukuran lolos 100 mesh, selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluoresence* (XRF).
2. Abu cangkang sawit ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi dengan ukuran lolos 100 mesh, selanjutnya dikarakterisasi *X-Ray Fluoresence* (XRF).
3. Serat dengan ukuran 2-5 cm, ditimbang sebanyak 0,5% diluar jumlah komposisi.
4. Larutan alkali NaOH 15 M ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
5. Larutan Na₂SiO₃ ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
6. *Superplasticizer* ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
7. Air ditimbang sesuai dengan 5 variasi komposisi.
8. Bentonit, abu cangkang sawit, serat, NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer*, dan air yang sudah ditimbang dengan masing-masing komposisi persentase, kemudian dicampur dan diaduk menjadi satu sampai rata. Selanjutnya yaitu proses pembuatan mortar geopolimer.

Tabel 3.1. Komposisi pembuatan mortar geopolimer

Variasi Komposisi	Bentonit (%)	Abu cangkang Sawit (%)	Rasio	NaOH (%)	Na ₂ SiO ₃ (%)	Super-plasticizer (%)	Air (%)
I	40,42	45,41	0,89	1,33	7,66	0,19	4,99
II	45,42	40,41	1,12	1,33	7,66	0,19	4,99
III	50,42	35,41	1,42	1,33	7,66	0,19	4,99
IV	55,42	30,41	1,82	1,33	7,66	0,19	4,99
V	60,42	25,41	2,38	1,33	7,66	0,19	4,99

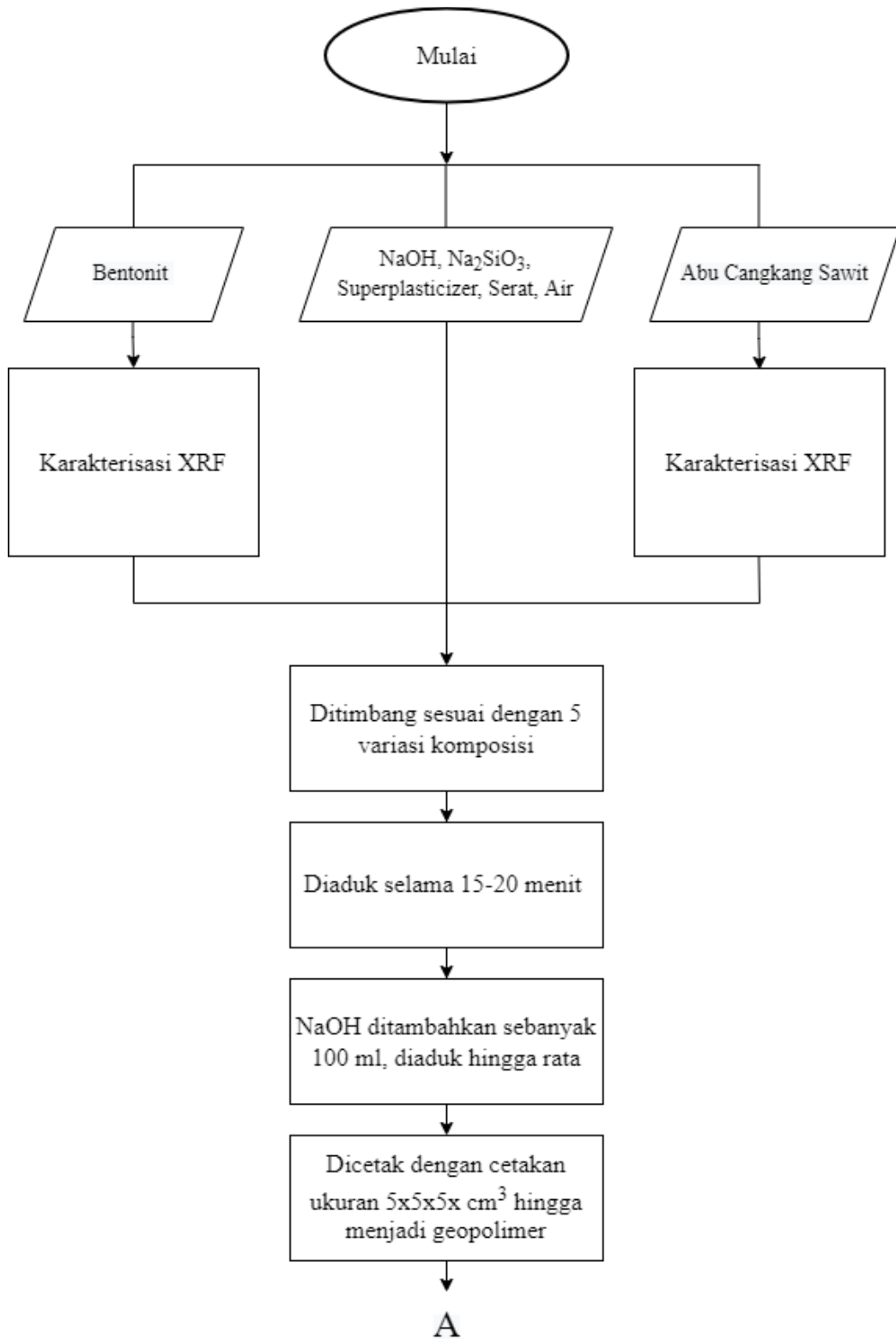
3.3.2 Tahap Pembuatan Mortar Geopolimer

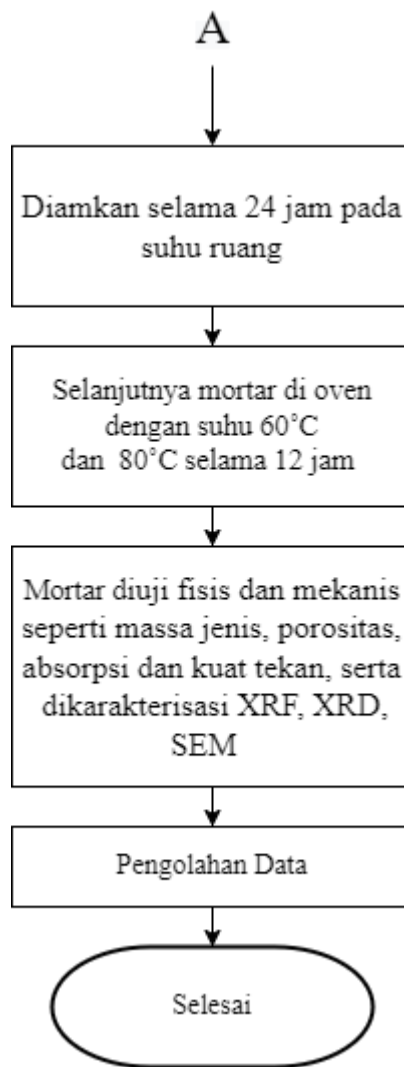
Tahapan pembuatan geopolimer dengan persentase 5 variasi komposisi seperti pada Tabel 3.1 adalah sebagai berikut:

1. Bentonit, abu cangkang sawit, serat, NaOH, Na₂SiO₃, *superplasticizer*, dan air diaduk selama 10-20 menit.
2. NaOH ditambahkan sebanyak 100 ml kemudian diaduk hingga rata.
3. Adonan tersebut kemudian dicetak dengan cetakan kubus berukuran 5x5x5 cm³ hingga berbentuk kubus.
4. Benda uji dikeringkan dengan suhu ruang selama 24 jam.
5. Benda uji dilepas dari cetakan dan diberi kode sampel.
6. Diamkan dengan suhu ruang selama 24 jam.
7. Curing menggunakan oven pada suhu 60 °C dan 80 °C selama 12 jam.
8. Mortar dikarakterisasi dengan *X-Ray Fluorescence* (XRF), *X-Ray Diffraction* (XRD), *Scanning Electron Microscopy* (SEM), uji fisis seperti massa jenis, porositas dan absorpsi, dan uji mekanis seperti kuat tekan.

3.4 Diagram Alir

Adapun diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.





Gambar 3.1. Diagram Alir Penelitian.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Mortar komposisi I pada suhu 80 °C (nilai kuat tekan tertinggi) diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 11,94 MPa dan 2,42 g/cm³, serta porositas dan absorpsi terendah sebesar 8,43% dan 3,48%. Sedangkan Mortar komposisi V (nilai kuat tekan terendah) pada suhu 60 °C nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar 1,37 MPa dan 1,88 g/cm³, serta porositas dan absorpsi terendah sebesar 13,66% dan 7,23%.
2. Hasil karakterisasi XRF pada mortar geopolimer komposisi I pada suhu 80 °C serta komposisi V pada suhu 60 °C menunjukkan bahwa komposisi kimia didominasi oleh senyawa SiO₂, Al₂O₃, CaO, Fe dan K.
3. Hasil karakterisasi XRD menunjukkan fase yang terbentuk pada mortar geopolimer komposisi I pada suhu 80 °C yaitu fase *anorthite*, *magnetite*, *microcline intermediate*, *silimanite*, *quartz* dengan intensitas tertinggi diperoleh pada fasa *quartz*. Sedangkan fase yang terbentuk mortar komposisi V pada suhu 60 °C yaitu *anorthite*, *magnetite*, *microcline intermediate*, *silimanite*, *quartz* dengan intensitas tertinggi diperoleh pada fasa *quartz*.

4. Hasil karakterisasi SEM dan EDS pada mortar geopolimer komposisi I pada suhu 80 °C serta komposisi V pada suhu 60 °C menunjukkan bahwa penyebaran unsur Si dan Al merupakan penyebaran unsur yang paling dominan.
5. Bentonit dan abu cangkang sawit layak dan dapat digunakan sebagai bahan utama pembuatan mortar geopolimer.

5.2. Saran

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

1. Melakukan pengawetan mortar pada suhu ruang tanpa pemanasan dengan waktu penyimpanan 3, 7, 14 dan 28 hari sebelum diuji sifat fisis dan mekanis
2. Menambahkan waktu 14 jam, 16 jam dan 18 jam serta suhu di atas 80 °C dalam proses pemanasan menggunakan oven.

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR PUSTAKA

- Abderrazek, K., Najoua, F. S., dan Srasra, E. 2016. Synthesis and characterization of [Zn–Al] LDH: Study of the effect of calcination on the photocatalytic activity. *Applied Clay Science*, 119, 229-235.
- Akhtar, K., Khan, S. A., Khan, S. B., dan Asiri, A. M. 2018. Scanning electron microscopy: Principle and applications in nanomaterials characterization. In *Handbook of materials characterization*. Springer, Cham. 113-145.
- Alsadey, S. 2015. Effect of superplasticizer on fresh and hardened properties of concrete. *Journal of Agricultural Science and Engineering*, 1(2), 70-74.
- Amin, M., & User, S. 2017. Pembuatan semen geopolimer ramah lingkungan berbahan baku mineral basal guna menuju lampung sejahtera. *Inovasi Pembangunan: Jurnal Kelitbangan*, 5(01), 30-45.
- Buchwald, A., Hohmann, M., Posern, K., dan Brendler, E. 2009. The suitability of thermally activated illite/smectite clay as raw material for geopolymer binders. *Applied Clay Science*, 46(3), 300-304.
- Calabria-Holley, J., Papatzani, S., Naden, B., Mitchels, J., dan Paine, K. 2017. Tailored montmorillonite nanoparticles and their behaviour in the alkaline cement environment. *Applied Clay Science*, 143, 67-75.
- Cullity, B., D. 1978. *Element of X-Ray Diffraction. Departement of Metallurgical Engeenering and Materials Science*. Addison-Wesley Publishing Company, Inc: USA. 277-281.
- Darma, E., S., P. 2013. Pengaruh Penggunaan Serat Polypropelyne Dari Bahan Strapping-Band Terhadap Kemampuan Mekanik Properties Beton. *Jurnal Teknik Sipil USU*, 2(1).
- Davidovits, J. 1994. High-alkali cements for 21st century concretes. Special Publication, 144, 383-398.
- Davidovits, J 1994. Proceedings First International Conference on Alkaline Cements and Concretes. *Properties of Geopolymer Cements*. Kiev: Kiev State Technical University.

- Davidovits, J. 1994. Global warming impact on the cement and aggregates industries. *World resource review*, 6(2), 263-278.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., dan van Deventer, J. S. 2007. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of materials science*, 42(9), 2917-2933.
- 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*, 8(2), 56-62.
- Goodarzi, A. R., Fateh, S. N., dan Shekary, H. 2016. Impact of organic pollutants on the macro and microstructure responses of Na-bentonite. *Applied Clay Science*, 121, 17-28.
- Graille, J., Lozano, P., Pioch, D., dan Geneste, P. 1985. Essais d'alcoololyse d'huiles végétales avec des catalyseurs naturels pour la production de carburants diesels.
- Hambali, M., Lesmania, I., Midkasna, A. 2013. Pengaruh komposisi kimia bahan penyusun paving block terhadap kuat tekan dan daya serap airnya. *Jurnal Teknik Kimia*. Vol. 19. 4, 14-21.
- 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*, 148, 189-193.
- Hao, Y. F., Yan, L. G., Yu, H. Q., Yang, K., Yu, S. J., Shan, R. R., dan Du, B. 2014. Comparative study on adsorption of basic and acid dyes by hydroxy-aluminum pillared bentonite. *Journal of Molecular Liquids*, 199. 202-207.
- Hardjito, D., Wallah, S.E., Sumajouw, D. MJ., dan Rangan, B. V. 2004. On the development of fly ash based geopolymer concrete. *ACI Mater J* 101:467–472.
- Hardjito, D., Wallah, S. E., Sumajouw, D. M., dan Rangan, B. V. 2005. Fly ash-based geopolymer concrete. *Australian Journal of Structural Engineering*, 6, 1, 77-86.
- Hilman, M. 2010. *Indonesia Second National Communication under the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)*, Republic of Indonesia Ministry of Environment.
- Hu, M., Zhu, X., dan Long, F. 2009. Alkali-activated fly ash-based geopolymers with zeolite or bentonite as additives. *Cement and Concrete Composites*, 31(10), 762-768.
- Islami, A. N., Saputra, E., dan Olivia, M. 2015. Kajian Parameter Mortar Geopolimer Menggunakan Campuran Abu Terbang (Fly Ash) dan Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash). *In Prosiding 2nd Andalas Civil Engineering National Conference* 160-167.

- Jamaludin, A., dan Darma, A. 2012. *Analisis Kerusakan X-Ray Fluoresence (XRF)*. Pusat Teknologi Bahan Nuklir Batan. No. 09-10/Tahun V. ISSN 1979-2409.
- Jamizar, I. G. R., dan Prima, Y. P. 2013, Pemanfaatan Abu Kerak Boiler Cangkang Kelapa Sawit Sebagai Bahan Tambahan (Admixture) Semen Terhadap Kuat Tekan Mortar, Prodi Teknik Sipil FT UNP, *J. Teknik sipil*, 3(1).
- Jiminez, A. M. F., Lachowski, E. E., Palomo, A., & Macphee, D. E. 2004. Microstructural characterisation of alkali-activated PFA matrices for waste immobilisation. *Cement and Concrete Composites*, 26(8), 1001-1006.
- Kalnicky, D.J., dan Singhvi, R. 2001. Field Portable X-RF Analysis of Enviromental Samples. *Journal of Hazardous Materials*. 83. 93-122.
- Karimah, R., dan Prasojo, A. 2019. Pembuatan Beton Porous Dengan Material Gepolimer Use Of Geopolymer In Porous Concrete.
- Kumar, S., Gautam, P. D., dan Kumar, B. S. 2019. Effect of Alkali Activator Ratio on Mechanical Properties of GGBS based Geopolymer Concrete. *IJITEE*, 8, 947-952.
- Kusuma, R. I., dan Mina, E. 2015. Stabilisasi tanah lempung dengan menggunakan abu sawit terhadap nilai kuat tekan bebas. *Fondasi: Jurnal Teknik Sipil*, 4(2).
- Laoli, M. E., Kaseke, O. H., Manoppo, M. R., dan Jansen, F. 2013. Kajian Penyebab Perbedaan Nilai Berat Jenis Maksimum Campuran Beraspal Panas yang Dihitung Berdasarkan Metode Marshall dengan yang Dicari Langsung Berdasarkan Aashto T209. *Jurnal Sipil Statik*, 1.2.
- Li, C., Wei, M., Evans, D. G., dan Duan, X. 2015. Recent advances for layered double hydroxides (LDHs) materials as catalysts applied in green aqueous media. *Catalysis Today*, 247, 163-169.
- Malau, F. B. 2014. Penelitian Kuat Tekan dan Berat Jenis Mortar Untuk Dinding Panel dengan Membandingkan Penggunaan Pasir Bengkulu dan Pasir Baturaja dengan Tambahan *Foaming Agent* dan *Silica Fume*. *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*. 2.2.
- Manuahe, R., Sumajouw, M. D., dan Windah, R. S. 2014. Kuat tekan beton geopolymer berbahan dasar abu terbang (*fly ash*). *Jurnal Sipil Statik*, 2.6.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., dan Corder, G. D. 2011. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary semen Portland. *Journal of cleaner production*, 19(9-10), 1080-1090.
- Mineral Commodity Summaries. 2014. *US Department of the Interior US Geological Survey*. <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/2014/mcs2014/> (accessed 10. 03.21).

- Mohammed, A., dan Abdullah, A. 2018. Scanning electron microscopy (SEM): A review. In *Proceedings of the 2018 International Conference on Hydraulics and Pneumatics—HERVEX, Băile Govora, Romania*. 7-9.
- Mohd Ariffin, M. A., Hussin, M. W., dan Rafique Bhutta, M. A. 2011. Mix design and compressive strength of geopolymer concrete containing blended ash from agro-industrial wastes. In *Advanced Materials Research* (Vol. 339, 452-457). Trans Tech Publications Ltd.
- Mulia, A. 2007. Pemanfaatan tandan kosong dan cangkang kelapa sawit sebagai briket arang.
- Munasir, Triwikantoro., Zainuri, M., dan Darminto. 2012. Uji XRD dan XRF Pada Bahan Mineral (Batuan dan Pasir) sebagai Sumber Material Cerdas (CaCO₃ dan SiO₂). *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*. 2 (1) 20-29.
- Nurhayati, H. 2010. Pemanfaatan Bentonit Teraktivasi Dalam Pengolahan Limbah Cair Tahu.
- Nurmaidah, U. M. A. 2015. Analisa Pengaruh temperature Air Terhadap Kuat Tekan Beton. *ARBITEK: Jurnal Teknik Sipil dan Arsitektur*, 1(2).
- Nurwidyanto, M.I., Meida, dan Sugeng, W. 2006. Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas pada batu Pasir. *Jurnal Berkala Fisika*. 9 (4) 191-195.
- Oktamuliani, S., Samsidar, M. Z., dan Nehru. 2015. Identifikasi mineral pada batuan granit di geopark merangin provinsi jambi menggunakan x-ray diffraction (XRD) dan scanning elektron microscopy. *Journal of Physics* Vol. 1. No. 1. Hal 56-64.
- 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* (Vol. 1887, No. 1, p. 020015). AIP Publishing LLC.
- Part, W. K., Ramli, M., dan Cheah, C. B. 2015. An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 77, 370-395.
- Patankar, S. V., Jamkar, S. S., dan Ghugal, Y. M. 2013. Effect of water-to-geopolymer binder ratio on the production of fly ash based geopolymer concrete. *Int. J. Adv. Technol. Civ. Eng*, 2(1), 79-83.
- Pavithra, P. E., Reddy, M. S., Dinakar, P., Rao, B. H., Satpathy, B. K., dan Mohanty, A. N. 2016. A mix design procedure for geopolymer concrete with fly ash. *Journal of cleaner production*, 133, 117-125.
- Ramadhan, Meydi Putra. 2011. Analisa Perbandingan Waktu dan Perbedaan Faktor Air Semen Serta Pengaruhnya Terhadap Kuat Tekan Uji Pada Mix

Design Yang Sama. Departemen Teknik Sipil. Fakultas Teknik. Universitas Sumatera Utara.

- Revi, N., dan Ishak, Y. 2020. Pengaruh Suhu Pembakaran Abu Cangkang Sawit Terhadap Nilai Kuat Tekan Mortar Geopolimer Berbahan Dasar Fly Ash. (Doctoral dissertation, Universitas Bina Darma).
- Riana, Glory. 2012. Pengaruh H₂O₂, Konsentrasi NaOH dan Waktu Terhadap Derajat Putih Pulp dari Mahkota Nanas. *Jurnal Teknik Kimia Unsri*. No 3 Vol 18.
- Ridha, M., dan Darminto, D. 2016. Analisis Densitas, Porositas, dan Struktur Mikro Batu Apung Lombok dengan Variasi Lokasi dan Kedalaman. *JFA (Jurnal Fisika dan Aplikasinya)*, 12(3).
- Rout, P. P., dan Garanayak, L. 2020. Characterization of Alkali Activated Bentonite-Fly Ash as Brick Material. In IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering* (Vol. 970, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- Santos, S. C., Oliveira, A. F., dan Boaventura, R. A. 2016. Bentonitic clay as adsorbent for the decolourisation of dyehouse effluents. *Journal of Cleaner Production*, 126, 667-676.
- Sembiring, S., dan Wasinton, S. 2015. *Silika Sekam Padi Potensinya sebagai Bahan Baku Keramik Industri*. Plantaxia: Yogyakarta.
- 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.
- Simanjuntak, J., O., Saragih, T. E., Lumbangaol, P., & Panjaitan, S. P. 2020. Beton Bermutu Dan Ramah Lingkungan Dengan Memanfaatkan Limbah Abu Cangkang Sawit. *Jurnal Darma Agung*, 28(3). 387-401.
- Slaty, F., Khoury, H., Wastiels, J., dan Rahier, H. 2013. Characterization of alkali activated kaolinitic clay. *Applied Clay Science*, 75. 120-125.
- Smallman, R.E., dan Bishop, R. J. 2000. *Metalurgi Fisik Modern dan Rekayasa Material*. Erlangga. Jakarta.
- Swardika, D. P. 2019. Pengaruh Rasio Larutan Alkali Aktivator Terhadap Kuat Tekan Beton Geopolimer Berbasis Fly Ash Ex PLTU Suralaya Banten. In *Prosiding Seminar Intelektual Muda* (Vol. 1, No. 2).
- Tangchirapat, W., Jaturapitakkul, C., dan Chindapasirt, P. 2009. Use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material for producing high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 23(7), 2641-2646.
- Tumingan, Tjaronge, M. W., Victor, S., dan Rudy, D. 2016. Penyerapan dan Porositas pada Beton Menggunakan Bahan Pond Ash sebagai Pengganti Pasir. *Politeknologi*. 15(1).

- Wibowo, M. T. 2007. Pengaruh penambahan trass muria terhadap kuat tekan, kuat tarik dan serapan air pada mortar. *Skripsi*. Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Widihati, I. G. 2009. Adsorpsi Ion Pb²⁺ oleh Lempung Terinterkalasi Surfaktan. *Jurnal Kimia*, 3(1), 27-32.
- Yamakawa, I., Kishtiani, K., Fukushi, I., dan Kuroha, K. 1990. Slump Control and Properties of Concrete with a New Superplasticizer. II. High strength in situ concrete work at Hicariga-Oka Housing project. In *RILEM Symposium on "Admixtures for Concrete. Improvement of Properties"*, Editor: E. Vasquez, Chapman dan Hall, London, 94-10.
- Yang, Y., Jiang, J., Hou, L., Lu, Z., Li, J., & Wang, J. 2020. Pore structure and properties of porous geopolymer based on pre-swelled bentonite. *Construction and Building Materials*, 254, 119226.
- Yofani, D. F., Olivia, M., Wibisono, G. 2021. Kuat Tekan Beton Geopolimer Hybrid FABA Dengan Penambahan Semen PCC. *Jurnal FTEKNIK*. Vol. 8. Edisi 1.
- Yusuf, M. O., Johari, M. A. M., Ahmad, Z. A., dan Maslehuddin, M. 2014. Strength and microstructure of alkali-activated binary blended binder containing palm oil fuel ash and ground blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 52, 504-510.
- Zahrina, I. 2007. Pemanfaatan Abu Sabut dan Cangkang Sawit sebagai Sumber Silika pada Sintesis ZSM-5 dari Zeolit Alam. *Jurnal sains dan teknologi*, 6(2), 31-33.
- Zumaro, A. R., dan Arbi, Y. 2017. Perancangan Reaktor Biogas Di Uptd Pasar Ternak Palangki. *Jurnal Sains dan Teknologi: Jurnal Keilmuan dan Aplikasi Teknologi Industri*, 17(1), 43-4.