

**PENGARUH SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA SEMEN DAN PENGGUNAAN
BOTTOM ASH SEBAGAI PENGANTI PASIR SERTA WAKTU
PERENDAMAN TERHADAP SIFAT FISIS DAN SIFAT MEKANIS PADA
MORTAR**

(Skripsi)

Oleh

**MONICA KARNAILIA
1817041025**



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

ABSTRAK

PENGARUH SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA SEMEN DAN PENGGUNAAN *BOTTOM ASH* SEBAGAI PENGGANTI PASIR SERTA WAKTU PERENDAMAN TERHADAP SIFAT FISIS DAN SIFAT MEKANIS PADA MORTAR

Oleh

Monica Karnailia

Telah dilakukan penelitian tentang penggunaan *fly ash* sebagai bahan substitusi semen dan *bottom ash* sebagai bahan pengganti pasir dalam pembuatan mortar dengan substitusi *fly ash* sebesar 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, dan 50 Wt% dari berat semen. Setelah mortar dikeluarkan dari cetakan dengan ukuran 5x5x5 cm mortar direndam (*curing*) di dalam bak berisi air selama 7, 14, dan 21 hari. Mortar diuji secara fisis dan mekanis meliputi uji porositas, massa jenis, absorpsi, dan kuat tekan serta dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) yang dilengkapi dengan *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). Hasil penelitian menunjukkan pembuatan mortar dengan substitusi *fly ash* 20 Wt% selama 21 hari perendaman menghasilkan kuat tekan yang optimum yaitu sebesar 63,74 kg/cm², dan massa jenis tertinggi sebesar 2,17 g/cm³, kemudian nilai porositas dan absorpsi terendah pada substitusi *fly ash* sebesar 20 Wt% selama 21 hari perendaman yaitu sebesar 19,84% dan 8,55%. Hasil XRF menunjukkan senyawa yang terbentuk pada produk mortar didominasi oleh senyawa CaO yaitu sebesar 57,31%, dan SiO₂ sebesar 24,60%. Hasil SEM menunjukkan pada sampel dengan substitusi *fly ash* sebesar 20 Wt% dengan waktu perendaman selama 21 hari memiliki bentuk yang bulat tidak beraturan dan memperlihatkan adanya aglomerasi atau penumpukan partikel menjadi satu serta penyebaran pori-pori lebih sedikit sehingga memiliki ikatan yang lebih kuat.

Kata kunci: *fly ash*, *bottom ash*, substitusi, mortar

ABSTRACT

THE EFFECT OF FLY ASH SUBSTITUTION ON CEMENT AND THE USE OF BOTTOM ASH AS A SUBSTITUTE FOR SAND AND IMMERSION TIME AGAINST THE PHYSICAL PROPERTIES AND MECHANICAL PROPERTIES OF MORTAR

By

Monica Karnailia

Research has been carried out on the use of *fly ash* as a cement substitution material and *bottom ash* as a substitute for sand in making mortar with *fly ash* substitution of 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, and 50 Wt% of the weight of cement. After the mortar is removed from the mold with a size of 5x5x5 cm the mortar is immersed in a bath filled with water for 7, 14, and 21 days. Mortars are physically and mechanically tested including porosity, density, absorption, and compressive strength tests and characterized using *X-Ray Fluorescence* (XRF) and *Field Emission Scanning Electron Microscopy* (FESEM) equipped with *Energy Dispersive Spectroscopy* (EDS). The results showed that mortar making with a *fly ash* substitution of 20 Wt% for 21 days of immersion produced an optimum compressive strength of 63,74 kg/cm², and the highest density of 2,17 g/cm³, then the lowest porosity and absorption values in fly ash substitution of 20 Wt% for 21 days of soaking were 19,84% and 8,55%. The XRF results show that the compounds formed in mortar products are dominated by CaO compounds, namely 57,31%, and SiO₂ by 24,60%. SEM results showed that samples with *fly ash* substitution of 20 Wt% with a soaking time of 21 days had an irregular round shape and showed agglomeration or accumulation of particles together and the spread of fewer pores so that they had stronger bonds.

Keywords: *fly ash*, *bottom ash*, substitution, mortar

**PENGARUH SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA SEMEN DAN PENGGUNAAN
BOTTOM ASH SEBAGAI PENGANTI PASIR SERTA WAKTU
PERENDAMAN TERHADAP SIFAT FISIS DAN SIFAT MEKANIS PADA
MORTAR**

Oleh

MONICA KARNAILIA

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar

SARJANA SAINS

Pada

Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Lampung



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

Judul Skripsi

PENGARUH SUBSTITUSI *FLY ASH* PADA SEMEN DAN PENGGUNAAN *BOTTOM ASH* SEBAGAI PENGANTI PASIR SERTA WAKTU PERENDAMAN TERHADAP SIFAT FISIS DAN SIFAT MEKANIS PADA MORTAR

Nama Mahasiswa

Monica Karnailia

Nomor Pokok Mahasiswa

1817041025

Program Studi

Fisika

Fakultas

Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam



Drs. Ediman Ginting, M.Si.

NIP. 19570825198603 1 002

Slamet Sumardi, M.T.

NIP. 19790426200604 1 005

2. Ketua Jurusan Fisika FMIPA

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

NIP. 198010102005011002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Drs. Ediman Ginting, M.Si.

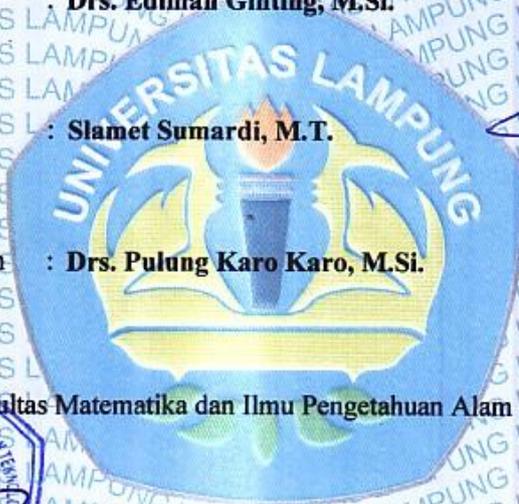
Sekretaris : Slamet Sumardi, M.T.

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

2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Dr. Eng. Sripto Dwi Yuwono, M.T.
NIP. 197407052000031001

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 6 Juni 2022



(Handwritten signatures of the examiners and dean)

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 hukuman yang berlaku.

Bandar Lampung, 6 Juni 2022



Monica Karnailia
NPM. 1817041025

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Monica Karnailia, dilahirkan pada tanggal 14 Oktober 2000 di Waringinsari, Pringsewu, Lampung. Penulis merupakan anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Heri Suandar dan Ibu Hartati. Pendidikan yang telah ditempuh oleh penulis adalah Sekolah Dasar Negeri 7 Bagelen pada Tahun 2012, Sekolah Menengah Pertama Negeri 1 Gadingrejo pada Tahun 2015, Sekolah Menengah Atas Negeri 1 Gadingrejo pada Tahun 2018.

Penulis diterima di Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung pada tahun 2018 melalui jalur SNMPTN. Pada Tahun 2021, penulis menyelesaikan Praktik Kerja Lapangan (PKL) di Pusat Penelitian Metalurgi dan Material Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI) Serpong, yang berjudul “Analisis Laju Korosi Pada Besi Cor Kelabu Dengan Media Larutan NaCl 3,5% Menggunakan Metode Polarisasi Potensiodinamik”. Penulis juga melakukan pengabdian terhadap masyarakat dengan mengikuti program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Mandiri Putra Daerah Universitas Lampung pada tahun 2021 di Desa Wiyono, Pesawaran. Dalam bidang organisasi penulis dipercaya sebagai anggota biro Kesekretariatan dan Rumah Tangga Himpunan Mahasiswa Fisika FMIPA Universitas Lampung (2019).

MOTTO

“Semuanya akan tetap baik-baik saja. Asal kamu percaya bahwa dirimu mampu melewatinya”

“Ora Et Labora

(Berusahalah sambil berdo’a)

-pepatah Latin

“Ingatlah kepada-Ku, pasti Aku ingat kepada-Mu. Bersyukurlah dan jangan mengingkari nikmat-Ku”

-Q.S. Al-Baqarah : 152

“Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan”

-Q.S. Al-Insyirah : 5

“Dan hanya kepada Tuhan-Mulah berharap”

-Q.S. Al-Insyirah : 8

PERSEMBAHAN

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

Bapak Tercinta Heri Suandar, dan Ibu Tercinta Hartati

Keluarga besar yang selalu memberi dukungan do'a dan semangat

Rekan-rekan seperjuangan “FISIKA FMIPA UNILA 2018”

Serta Almamater Tercinta “Universitas Lampung”

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberi nikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Substitusi *Fly Ash* Pada Semen dan Penggunaan *Bottom Ash* Sebagai Pengganti Pasir Serta Waktu Perendaman Terhadap Sifat Fisis dan Sifat Mekanis Pada Mortar”** yang merupakan syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains (S.Si) pada bidang Material Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Lampung.

Penulis menyadari bahwa dalam penyajian skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat menjadi rujukan untuk penelitian selanjutnya agar lebih sempurna dan dapat memperkaya ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 6 Juni 2022

Monica Karnailia
NPM. 1817041025

SANWACANA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, yang telah memberi kesehatan, hikmat, karunia serta rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Substitusi *Fly Ash* Pada Semen dan Penggunaan *Bottom Ash* Sebagai Pengganti Pasir serta Waktu Perendaman Terhadap Sifat Fisis dan Sifat Mekanis Pada Mortar”**. Terwujudnya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Dengan segala kerendahan hati dan rasa hormat, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Drs. Ediman Ginting, M.Si., selaku Pembimbing Pertama yang telah banyak memberi bimbingan, motivasi, nasihat serta ilmunya.
2. Bapak Slamet Sumardi, M.T., selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan saran, masukan dan arahan dalam penulisan skripsi ini.
3. Bapak Muhammad Amin, S.T., selaku Pembimbing Lapangan yang telah membantu selama proses penelitian ini.
4. Bapak Drs. Pulung Karo Karo, M.Si., selaku Penguji yang telah memberikan koreksi dan masukan selama penulisan skripsi.
5. Bapak Dr. Eng. Suropto Dwi Yuwono, M.T., selaku Dekan FMIPA Universitas Lampung.

6. Bapak Gurum Ahmad Pauzi, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika FMIPA Universitas Lampung.
7. Ibu Suprihatin, S.Si., M.Si., selaku Pembimbing Akademik yang memberikan masukan-masukan serta nasehat selama masa studi di Jurusan Fisika.
8. Kepala Pusat Riset Teknologi Pertambangan-BRIN Lampung.
9. Kedua orang tuaku Bapak Heri Suandar dan Ibu Hartati kedua kakakku Pradita Sukaman dan Reni Apriyani dan adikku Yolla Windia Citra serta keponakanku Alshamira Hanin Sukmana yang selalu memberikan cinta kasih, dukungan, pengorbanan dan do'a untuk penulis.
10. Sahabatku Rahmi, Afrida, Cherly, Lambert serta keluarga Cimini yang selalu mendengarkan keluh kesahku serta yang selalu memberi do'a dan dukungan. Untuk Desy, Rahmadiarti, Nindya Aisah, Grace, Silvi, Juana dan teman-teman lainnya yang tidak bisa disebutkan satu-persatu yang selalu ada disaat senang dan susah serta menjadi kawan diskusi yang baik. Semoga Allah SWT membalas dengan hal yang lebih baik. Aamiin.
11. Serta teman-teman seperjuangan Fisika 2018.
12. Untuk diriku terimakasih telah berjuang dan bertahan sampai sejauh ini, terimakasih untuk tidak menyerah pada keadaan meskipun sedang mengalami kesulitan.

Semoga Allah SWT membalas kebaikan dengan hal yang lebih baik

Bandar Lampung, 6 Juni 2022

Monica Karnailia

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	i
ABSTRACT	ii
Judul Skripsi	iv
MENGESAHKAN	v
PERNYATAAN	vi
MOTTO	viii
PERSEMBAHAN	ix
KATA PENGANTAR	x
SANWACANA	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
I. PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	5
1.3. Tujuan Penelitian	5
1.4. Batasan Masalah	6
1.5. Manfaat Penelitian	7
II. TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Semen.....	8
2.2. <i>Fly Ash</i> (Abu Terbang)	12

2.3. <i>Bottom Ash</i>	14
2.4. Mortar	15
2.5. Air	19
2.6. Reaksi Hidrolisis	20
2.7. Pengujian dan Karakterisasi	21

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	29
3.2. Alat dan Bahan	29
3.2.1 Alat Penelitian	29
3.2.2 Bahan Penelitian	29
3.3. Metode Penelitian	30
3.3.1 Karakterisasi Bahan	30
3.3.2 Pembuatan Mortar	30
3.3.3 Karakterisasi dan Analisis Mortar	32
3.3.4 Pengujian Mortar	32
3.4. Perawatan Mortar dalam Air (<i>Curing</i>)	34
3.5. Diagram Alir	35

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Hasil Karakterisasi Bahan	37
4.1.1 Karakterisais X-Ray Fluorescence (XRF) Fly Ash	37
4.1.2 Karakterisais X-Ray Fluorescence (XRF) Bottom Ash	39
4.1.3 Karakterisasi <i>X-Ray Fluorescence</i> (XRF) Semen	40
4.2. Hasil Uji Fisis Mortar	41
4.2.1 Hasil Pengujian Massa Jenis Mortar	41
4.2.2 Hasil Pengujian Porositas Mortar	42
4.2.3 Hasil Pegujian Absorpsi Mortar	43
4.2.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Mortar	45
4.3. Hasil Karakterisasi Mortar	47
4.3.1 Hasil Karakterisasi XRF pada Mortar	47
4.3.2 Hasil Karakterisasi SEM pada Mortar	48

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan	57
5.2. Saran	58

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Semen <i>Portland</i> PCC (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN)	9
Gambar 2.2 Mortar (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN)	16
Gambar 2.3 Pengujian Kuat Tekan (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN)	22
Gambar 2.4 Prinsip kerja XRF (Atmodjo <i>et al.</i> , 2013).....	26
Gambar 2.5 Prinsip kerja SEM	28
Gambar 3.1 Perawatan Mortar dalam Air (<i>curing</i>).....	35
Gambar 3.2 Diagram alir preparasi bahan	35
Gambar 3. 3 Diagram alir pembuatan dan pengujian sampel	36
Gambar 4.1 Hubungan kadar <i>fly ash</i> dan waktu perendaman terhadap massa jenis mortar	41
Gambar 4.2 Hubungan kadar <i>fly ash</i> dan waktu perendaman terhadap porositas mortar	42
Gambar 4.3 Hubungan substitusi <i>fly ash</i> dan waktu perendaman terhadap absropsi mortar	43
Gambar 4.4 Hubungan substitusi <i>fly ash</i> dan waktu perendamna terhadap kuat tekan mortar	45
Gambar 4. 5 Hasil morfologi sampel mortar dengan susbtitusi <i>fly ash</i> 20 Wt% ..	49

Gambar 4. 6 Hasil analisis SEM mortar substitusi <i>fly ash</i> 20 Wt% dengan perbesaran 5000 kali	50
Gambar 4. 7 Analisis EDS mortar dengan substitusi <i>fly ash</i> 20 Wt%	51
Gambar 4. 8 Hasil morfologi sampel mortar dengan substitusi <i>fly ash</i> 50 Wt% ..	52
Gambar 4. 9 Hasil analisis SEM mortar substitusi <i>fly ash</i> 50 Wt% dengan perbesaran 5000 kali	53
Gambar 4. 10 Analisis EDS mortar dengan substitusi <i>fly ash</i> 50 Wt%	54

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 4.1 Hasil Karakterisasi XRF <i>Fly Ash</i>	38
Tabel 4.2 Hasil Karakterisasi XRF <i>Bottom Ash</i>	39
Tabel 4.3 Hasil Karakterisai XRF Semen.....	40
Tabel 4.4 Hasil Karakterisasi XRF pada mortar dengan kadar <i>fly ash</i> 20 Wt% dan 50 Wt%	47
Tabel 4. 5 Komposisi elemen dari mortar dengan substitusi <i>fly ash</i> 20 Wt%	51
Tabel 4. 6 Komposisi elemen dari mortar dengan substitusi <i>fly ash</i> 50 Wt%	54

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Sebagai sumber daya yang paling banyak dikonsumsi, semen merupakan bahan buatan manusia yang paling banyak digunakan kedua setelah air. Dalam produksinya semen banyak dimanfaatkan dibidang konstruksi salah satunya pada pembuatan beton. Namun, disamping itu semen menjadi sumber dari sekitar 8% emisi gas karbondioksida (CO₂) dunia yang dapat mencemari lingkungan. Sehingga harus dicari alternatif bahan substitusi semen. Industri pembangkit listrik tenaga uap/boiler dari sebelumnya menggunakan minyak berganti menggunakan batubara sebagai alternatif dari mahalnya bahan bakar tersebut (Hamidi dkk, 2014). Batubara digunakan sebagai pengganti minyak pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), dimana produksi batubara relatif banyak sekitar 5,5 persen produksi dunia atau urutan kelima produsen batubara terbesar dunia. Pada tahun 2015 produksi batubara Indonesia sebesar 425 juta ton dihasilkan oleh BUMN PT. Bukit Asam dari tambang di Muara Enim (Sumsel) dan Sawah Lunto (Sumbar). Produksi ini meningkat secara tajam diakibatkan perkembangan teknologi PLTU (Nugroho, 2017).

Sebagai bahan pada pembangkit listrik tenaga uap batubara menghasilkan limbah

buangan atau residu dari hasil pembakaran batubara yang tidak terpakai yaitu *fly ash*, *bottom ash* atau sering disebut FABA. Diperkirakan jumlah produksi *fly ash* pertahun yang dihasilkan di seluruh dunia mencapai lebih dari 500 juta ton (Syafri dkk, 2016), sedangkan di Indonesia produksi limbah *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU berdasarkan pernyataan dari Ditjen Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) menghasilkan limbah batubara yang berkisar 5% dari 166,2 juta ton yaitu sebesar 8,31 juta ton di tahun 2019. *Fly ash* (abu terbang) adalah limbah padat yang dihasilkan dari pembakaran batubara pada pembangkit tenaga listrik, sehingga sifat kimia dari *fly ash* dipengaruhi oleh jenis batubara yang dibakar, teknik penyimpanan dan penanganannya. *Fly ash* mengandung oksida yaitu SiO_2 , Al_2O_3 dan $\text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$ (ASTM C618, 2015). Dengan ukuran *fly ash* yang halus, oksida silika yang dikandung di dalam *fly ash* akan bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida $\text{Ca}(\text{OH})_2$ yang terbentuk dari hidrasi semen dan akan menghasilkan zat yang memiliki kemampuan mengikat yaitu kalsium silikat hidrat (CSH) (Djiwantoro, 2001).

Pada pembakaran batubara lignit dan sub-bituminous dihasilkan abu terbang dengan kalsium dan magnesium oksida lebih banyak dibandingkan jenis bituminous. Kandungan utama *fly ash* dari hasil pembakaran batubara berdasarkan karakterisasi *X-Ray Fluorescence* (XRF) antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3), kalsium Oksida (CaO); dan magnesium, potassium, sodium, titanium, dan belerang dalam jumlah yang sedikit (Setiawati, 2018).

Perbedaan yang terkandung pada abu terbang atau *fly ash* dapat dibedakan menjadi 3 jenis terdiri dari kelas C yaitu abu terbang yang mengandung CaO lebih dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub bitumen batubara,

kelas F abu terbang yang mengandung CaO kurang dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran anthracite atau bitumen batubara dan kelas N (*pozzolan* alam atau hasil pembakaran yang dapat dikategorikan antara lain tanah diatomic, opaline chertz dan shales, tuff dan abu vulkanik) (Simatupang dkk, 2016). Secara umum, penggunaan *fly ash* sebagai bahan pengganti sebagian berat semen terbatas pada *fly ash* tipe F dimana *fly ash* dapat menggantikan semen sampai 30% berat semen yang dipergunakan dan dapat meningkatkan ketahanan kimia. Perbandingan antara *fly ash* dan semen Portland dapat ditinjau dari kemiripan yang terdapat pada kedua material tersebut seperti sifat fisik, sifat kimia, dan sifat pozzolan (Setiawati, 2018).

Penelitian sebelumnya mengenai material yang digunakan sebagai substitusi semen, yaitu seperti penelitian yang dilakukan oleh Wenno dkk, (2014) mengenai penggunaan *fly ash* sebagai substitusi parsial semen pada pembuatan mortar. Komposisi penambahan *fly ash* sebanyak 0%, 5%, 10%, 15%, 20% dan 25% dari berat semen yang akan digunakan. Hasil penelitian didapatkan kuat tekan optimum pada variasi 15% yaitu sebesar 27,71 MPa. Penelitian lainnya yang dilakukan oleh Punisingon dkk, (2019) mengenai pengujian kuat tekan beton daur ulang dengan bahan tambah abu terbang (*fly ash*) dan serbuk kaca sebagai substitusi parsial semen dengan variasi 0%, 2,5%, 7,5%, 10,5%, 12,5% dan 15% untuk *fly ash*. Hasil penelitian diperoleh kuat tekan optimum pada *fly ash* 20% dari jumlah semen pada waktu perendaman 28 hari mencapai kuat tekan maksimum yaitu sebesar 18,61 MPa. Penelitian yang dilakukan Nofrisal dan Rantesalu, (2020) mengenai pemanfaatan *fly ash* sebagai substitusi pengganti semen terhadap kuat tekan mortar, dimana presentase *fly ash* yang digunakan

mulai dari 10%, 15%, 25% dan 40% dimana mortar yang akan diuji pada umur 7, dan 28 hari setelah dilakukan perendaman (*curing*). Hasil penelitian yang diperoleh bahwa nilai kuat tekan tertinggi pada penggunaan 15% *fly ash*, yaitu 81,73 Kg/cm² pada umur 28 hari. Awal umur beton, penggunaan *fly ash* mempengaruhi kekuatan beton dengan kuat tekan maksimum. Penelitian yang dilakukan Rafiezoonooz *et al*, (2016) menggunakan *fly ash* sebagai bahan substitusi semen pada beton dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir. Komposisi substitusi *fly ash* sebesar 20% dan *bottom ash* 10%, 20%, 50%, dan 75% dengan waktu perendaman selama 8 hari, 91 hari, dan 180 hari. Hasil penelitian yang diperoleh kuat tekan maksimum pada substitusi *fly ash* 20% dan *bottom ash* 75% pada umur 180 hari sebesar 31,62 MPa.

Provinsi Lampung menyimpan sejumlah potensi batubara yang sangat besar di beberapa Kabupaten. Hal ini sejalan dengan penggunaan batubara sebagai sumber energi pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) di provinsi Lampung, sehingga limbah batubara yaitu *fly ash* dan *bottom ash* begitu melimpah. Banyaknya limbah yang dihasilkan saat pembakaran batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) menjadi alasan dimanfaatkannya limbah *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir, selain itu pula dapat mengurangi emisi gas CO₂ (Sujivorakul, 2011).

Pada penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perilaku kinerja *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir dalam pembuatan mortar, dengan kadar *fly ash* 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, dan 50 Wt% dari berat semen. Mortar dicetak berbentuk kubus dengan ukuran 5x5x5 cm³, perendaman mortar dilakukan selama 7, 14, dan 21 hari. Kemudian

dilakukan karakterisasi *fly ash* dan mortar menggunakan *X-Ray Fluorescence* (XRF) untuk mengetahui komposisi kimia dan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) untuk melihat morfologi permukaan dan ukuran butir. Selain itu, mortar diuji massa jenis, porositas, absorpsi dan kuat tekan untuk mengetahui sifat fisis dan mekanis mortar.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah dari penelitian ini adalah :

1. Apakah *fly ash* dapat digunakan sebagai substitusi semen dan *bottom ash* dapat digunakan sebagai pengganti pasir pada mortar?
2. Bagaimana pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap komposisi kimia (XRF) dan morfologi permukaan (SEM) pada mortar?
3. Bagaimana pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap sifat fisis (massa jenis, porositas, dan absorpsi) pada mortar?
4. Bagaimana pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap sifat mekanis (kuat tekan) pada mortar?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh penggunaan *fly ash* sebagai substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap sifat fisis dan sifat mekanis pada mortar.

2. Mengetahui pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap komposisi kimia, dan morfologi permukaan pada mortar.
3. Mengetahui pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap sifat fisis (massa jenis, porositas, dan absorpsi) pada mortar.
4. Mengetahui pengaruh komposisi *fly ash* pada substitusi semen dan *bottom ash* sebagai pengganti pasir terhadap sifat mekanis (kuat tekan) pada mortar.

1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah :

1. *Fly ash* dan *Bottom ash* yang digunakan berasal dari PLTU Tarahan, Kabupaten Lampung Selatan.
2. Jenis semen yang digunakan adalah semen *Portland Composite Cement* (PCC).
3. Perbandingan komposisi antara semen dan *bottom ash* 1:5 dari berat total bahan.
4. Substitusi *fly ash* terhadap semen yang digunakan yaitu 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, dan 50 Wt% dari berat semen.
5. Waktu perendaman mortar dalam air (*curing*) selama 7, 14, dan 21 hari.
6. Mortar dicetak dengan ukuran 5x5x5 cm.
7. Tingkat kehalusan *fly ash* yang digunakan lolos ayakan 350 *mesh*.

8. Karakterisasi yang digunakan *X-Ray Fluorescence (XRF)*, *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)* dan uji fisis dan mekanis meliputi porositas, absorpsi, massa jenis dan kuat tekan.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Mengetahui pengaruh komposisi *fly ash* sebagai substitusi semen dalam pembuatan mortar.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi bagi industri bahan bangunan.
3. Secara akademis dapat memberikan wawasan bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi khususnya dalam pembuatan mortar.
4. Sebagai tambahan referensi bagi penelitian selanjutnya.
5. Sebagai tambahan referensi di Jurusan Fisika FMIPA Unila, terutama bidang Fisika Material.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Semen

Bahan semen adalah pengikat hidrolisis atau bahan perekat diproduksi dalam bentuk bubuk halus yang diperoleh dengan menghaluskan klinker bahan ini terutama termasuk silikat-silikat kalsium yang bersifat hidrolis. Pembuatan semen terdiri dari batu kapur, tanah liat, pasir besi yang mengandung silika, alumina, oksida besi, dan oksida-oksida yang digunakan untuk merekat, melapis, dan membuat mortar (Zuraidah dan Hastono, 2017).

Bersumber pada Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 15-2049-2004, semen portland merupakan semen hidrolisis dimana diperoleh dari menggiling terak (clinker) Portland terutama yang terdiri kalsium silikat ($x\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) yang bersifat hidrolisis dan digiling bersama material tambahan Kristal senyawa kalsium sulfat ($\text{CaSO}_4\cdot x\text{H}_2\text{O}$). Semen bersifat hidrolisis hal ini berarti semen akan cepat bereaksi dengan air. Kondisi ini bersifat *irreversible* dimana hanya dapat terjadi satu kali dan tidak bisa kembali seperti semula. Salah satu jenis semen yang banyak digunakan secara umum ditunjukkan pada **Gambar 2.1**.



Gambar 2.1 Semen *Portland PCC* (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN)

Menurut Standar Nasional Indonesia (SNI) nomor 15-2049-2004 ada beberapa jenis semen antara lain :

a. *Portland Semen*

Semen jenis ini paling umum penggunaannya di seluruh dunia karena merupakan bahan dasar beton, dan plesteran semen.

b. *Oil Well Cement*

Jenis semen ini ialah semen khusus yang lebih tepat digunakan pada pembuatan sumur minyak bumi dan gas alam dengan konstruksi sumur minyak bawah permukaan laut dan bumi. Jenis OWC yang diproduksi sampai saat ini seperti *class G*, HSR (*High Sulfat Resitance*) atau disebut sebagai “*Basic OWC*”.

c. *Portland Pozzolan Cement*

Merupakan semen hidrolisis yang diperoleh dengan menggiling *clinker*, *gypsum* dan bahan *pozzolan*. Produk ini cocok untuk dipakai pada bangunan umum dan bangunan yang membutuhkan ketahanan sulfat dan panas hidrasi yang sedang

seperti jembatan, jalan raya, perumahan, dermaga, beton, bendungan, bangunan irigasi dan fondasi pelat penuh.

d. Semen Putih

Digunakan untuk pekerjaan penyelesaian (*finishing*) sebagai *filler* atau pengisi. Semen jenis ini dibuat dari bahan utama kalsit (*calcite*) *limestone* murni.

e. *Portland Composite Cement*

Secara umum banyak digunakan pada bangunan, sama dengan penggunaan OPC dengan kuat tekan yang sama. PCC mempunyai panas hidrasi yang lebih rendah selama proses pendinginan dibandingkan dengan OPC, sehingga pengerjaan akan lebih mudah dan menghasilkan permukaan beton/plester yang lebih rapat dan lebih halus.

Berdasarkan SNI 2049:2015 semen *Portland / Ordinary Portland Cement* (OPC) dikelompokkan menjadi :

1. *Portland Cement Type I (Ordinary Portland Cement)*

Semen *Portland* tipe I adalah jenis semen yang paling banyak dibutuhkan oleh masyarakat secara luas dan dapat dipakai untuk seluruh aplikasi yang tidak membutuhkan persyaratan khusus.

2. *Portland Cemen Type II (Moderate Sulfat Resistance)*

Semen *Portland* tipe II merupakan semen dengan panas hidrasi sedang atau di bawah semen pada tipe I juga tahan terhadap sulfat. Biasanya semen ini cocok digunakan pada daerah dengan suhu tinggi serta struktur *drainase*. Semen ini

disarankan dipakai pada bangunan seperti bendungan, dermaga dan landasan berat yang ditandai dengan adanya kolom-kolom dan dimana proses hidrasi rendah juga merupakan pertimbangan utama.

3. Portland Cement Type III (High Early Strength Portland Cement)

Tipe ini dapat dipergunakan pada daerah yang memiliki temperatur rendah, terutama pada daerah yang mempunyai musim dingin. Kegunaan pembuatan jalan beton, landasan lapangan udara, bangunan tingkat tinggi, bangunan dalam air yang tidak memerlukan ketahanan terhadap sulfat.

4. Portland Cement Type IV (Low Heat Of Hydration)

Semen tipe ini digunakan untuk keperluan konstruksi yang memerlukan jumlah dan kenaikan panas harus diminimalkan. Oleh karena itu semen jenis ini akan memperoleh tingkat kuat tekan beton dengan lebih lambat ketimbang *Portland* tipe I. Tipe semen seperti ini digunakan untuk struktur beton masif seperti dam gravitasi besar yang mana kenaikan temperatur akibat panas yang dihasilkan selama proses *curing* merupakan faktor kritis.

5. Portland Cemen Type V (Sulfat Resistance Cement)

Cocok digunakan untuk pembuatan beton pada daerah yang tanah dan airnya mempunyai kandungan garam sulfat tinggi. Sangat cocok untuk instalasi pengolahan limbah pabrik, konstruksi dalam air, jembatan, terowongan, pelabuhan, dan pembangkit tenaga nuklir.

2.2. *Fly Ash* (Abu Terbang)

Fly ash merupakan hasil pemisahan sisa pembakaran halus dari pembakaran batubara yang mengalir melalui boiler berupa kepulan asap dari ruang bakar. Sekitar 75-90% abu dari cerobong asap dapat ditangkap oleh *system electrostatic precipitator*. Sisanya terletak dibagian bawah tungku (disebut *bottom ash*). Menurut ASTM C618 – 19 *fly ash* didefinisikan sebagai partikel halus yang dihasilkan oleh pembakaran batubara atau bubuk batubara. *Fly ash* dan *slag* telah terbukti menjadi sumber bahan pembuatan geopolimer. *Fly ash* dianggap menguntungkan karena reaktivitas partikelnya lebih halus daripada *slag*. *Fly ash* merupakan limbah yang dihasilkan dari pembakaran batubara dan mengalir keluar dari ruang pembakaran. *Fly ash* adalah bubuk keabu-abuan yang sangat ringan, *fly ash* merupakan bahan oksida anorganik yang mengandung 58,20% silika (SiO_2) (Rochmanto, 2019).

Fly ash dapat dibedakan menjadi 3 jenis (*ACI Manual of Concrete Practice 1993 Parts 1 226.3R-3i*), yaitu:

1) Kelas C

Kriteria kelas C yaitu:

Fly ash yang mengandung CaO lebih dari 10%, dihasilkan dari pembakaran lignite atau sub bitumen batubara dengan kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 50\%$ dan kadar Na_2O mencapai 10%, pada campuran beton digunakan sebanyak 15%-35% dari total berat binder.

2) Kelas F

Kriterial kelas F yaitu:

Fly ash yang mengandung CaO kurang dari 10%, dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau bitumen batubara dengan kadar $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) > 70\%$ dan kadar $\text{Na}_2\text{O} < 5\%$, pada campuran beton digunakan sebanyak 15%-25% dari total berat binder.

3) Kelas N

Pozzolan alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah diatomic, *opaline chertz*, dan *shales*, tuff dan abu vulkanik, dimana bisa diproses melalui pembakaran atau tidak. Selain itu juga berbagai hasil pembakaran yang mempunyai sifat *pozzoland* yang baik.

Dari ketiga jenis *fly ash* di atas yang bisa digunakan sebagai geopolimer adalah jenis *fly ash* yang memiliki kandungan CaO rendah dan kandungan Si dan Al yang lebih dari 50% yaitu *fly ash* tipe C dan F karena Si dan Al merupakan unsur yang utama dalam terjadinya proses geopolimerisasi. Geopolimer yang menggunakan *fly ash* tipe C menghasilkan kuat tekan lebih tinggi dibandingkan dengan *fly ash* tipe F baik yang menggunakan *curing* dengan oven maupun pada suhu ruang. *Fly ash* cukup baik digunakan sebagai bahan ikat karena bahan penyusun utamanya adalah *silicon dioksida* (SiO_2), aluminium (Al_2O_3), besi (Fe_2O_3) dan kalsium (CaO) sedangkan magnesium, potassium, sodium, titanium, dan sulfur juga ada tetapi dalam jumlah yang kecil. Kelemahan pemakaian *fly ash* kurang baik untuk pengerjaan beton yang memerlukan waktu pengerasan dan kekuatan awal yang tinggi karena proses pengerasan dan penambahan kekuatan

betonnya agak lambat yang disebabkan karena terjadi reaksi pozzolan (Suarnita, 2011).

Meningkatnya kadar *fly ash* dapat mengurangi kebutuhan air, hal ini dikarenakan oleh bentuk partikel *fly ash* yang bulat dan memiliki ukuran yang sangat kecil sehingga mengurangi *void* (Naganathan *et al*, 2015). Reaksi pozzolan *fly ash* cukup lambat pada usia dini, sehingga berperilaku sebagai *micro aggregate* untuk mengisi pori beton. Pada usia lebih lanjut, *fly ash* mulai menimbulkan efek kimia dan meningkatkan kuat tekan (Mengxiao *et al*, 2015).

2.3. Bottom Ash

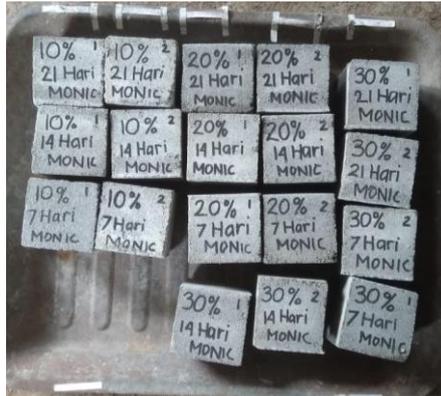
Sama halnya dengan *fly ash*, *bottom ash* merupakan hasil pembakaran batubara di boiler pembangkit listrik tenaga uap (PLTU). Ukuran partikel *bottom ash* lebih besar dari pada *fly ash*, sehingga *bottom ash* jatuh ke dasar tungku pembakaran. Bentuk fisik abu dasar mirip dengan pasir sungai alami, dan kadarnya dibagi menjadi pasir halus dan pasir kasar (Singh dan Siddique, 2015). Ukuran partikel *fly ash* yang besar, menghasilkan *workability* campuran yang menggunakan *bottom ash* yang kurang baik dibandingkan semen dan *fly ash*. Secara umum, reaksi pozzolan abu batubara berkaitan dengan kehalusan partikel, dalam hal ini ukuran partikel *bottom ash* yang lebih kasar dan lebih besar dari *fly ash* diyakini dapat menyebabkan reaksi pozzolan tidak efektif (Kim, 2015).

Dibandingkan dengan campuran tanpa abu dasar, campuran beton yang dihasilkan dengan menggunakan abu dasar sebagai pengganti agregat halus memiliki kuat tekan dan ketahanan aus yang lebih rendah. Hal ini erat kaitannya dengan kuat

tekan, semakin tinggi kuat tekan maka semakin tinggi pula ketahanan ausnya (Sing dan Siddique, 2015).

2.4. Mortar

Mortar adalah campuran agregat halus (pasir), air, dan bahan pengikat yang diaduk merata sampai mengeras, bahan pengikat yang umum digunakan adalah semen (Wibowo, 2007). Mortar yang baik memiliki kuat tekan yang tinggi dan sifat fisik yang baik, sehingga mutu mortar memenuhi persyaratan SNI (Adi, 2009). Selain itu, fungsi utama mortar adalah untuk memperkuat ikatan dan anti ikatan dengan komponen bangunan. Mortar harus tahan terhadap penyerapan air dan kuat gesernya dapat menahan gaya-gaya yang bekerja pada mortar. Jika jumlah air yang terserap dalam mortar terlalu besar atau terlalu cepat, mortar akan cepat mengeras dan kehilangan daya lekatnya. Mortar memiliki standar viskositas yang digunakan untuk mengetahui kekuatan mortar yang digunakan sebagai pelapis dinding, sehingga diharapkan mortar dapat menahan gaya tekan akibat beban yang bekerja padanya (Mulyono, 2003). Mortar yang digunakan dalam penelitian ini ditampilkan pada **Gambar 2.2**.



Gambar 2. 2 Mortar (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan– BRIN)

Mortar dapat digolongkan dari penggunaannya, yakni untuk tembok, sambungan, dan lantai. Mortar yang berfungsi sebagai sambungan digunakan untuk menyambung bata, batu, dan blok beton. Sedangkan mortar yang berfungsi sebagai tembok digunakan dalam berbagai perbandingan campuran untuk memenuhi keperluan pekerjaan. Berdasarkan jenis bahan ikatnya mortar dapat dibagi menjadi empat jenis yaitu (Tjokrodimuljo, 2007):

1. Mortar air adalah jumlah adukan dan jumlah pasir yang diperoleh dari adukan yang baik dengan jumlah yang tepat. Terlalu sedikit pasir dapat menghasilkan mortar yang retak-retak setelah mengeras. Terlalu banyak pasir menyebabkan adukan kurang dapat melekat dengan baik. Mortar jenis ini digunakan sebagai bahan tembok atau tungku api di pedesaan (Tjokrodimuljo, 2007).
2. Mortar kapur adalah campuran yang terdiri dari air, pasir, semen merah dan kapur. Mortar kapur dibuat dari kapur dan air yang dicampur dalam keadaan kering kemudian ditambahkan air. Selama proses pelekatan kapur mengalami susutan sehingga jumlah pasir yang umum digunakan adalah tiga kali volume

kapur. Jenis kapur yang biasa digunakan yaitu *fat lime* dan *hydraulic lime* (Tjokrodimuljo, 2017).

3. Mortar semen adalah campuran dari adukan semen, pasir, dan air. Mortar semen sering digunakan untuk bagian luar (dinding/tembok) pasta yang disebut pasta semen. Dalam adukan mortar, air dan semen terbentuk di antara butir-butir agregrat halus sehingga butiran-butiran agregrat saling terikat dengan kuat dan padat (Tjokrodimuljo, 2017).
4. Mortar khusus diperoleh dengan menambahkan zat adiktif seperti *asbestos fibres*, *jutes fibres* (serat alami), butir-butir kayu, serbuk gergaji kayu dan serbuk kaca. Mortar khusus digunakan dengan tujuan dan maksud tertentu, contohnya sebagai mortar tahan api yang diperoleh dengan penambahan serbuk bata merah dan *aluminous cement*, dengan perbandingan satu *aluminous cement* dan dua serbuk batu api (Simanullang, 2014).

Menurut Tjokrodimuljo (2007), mortar memiliki beberapa sifat menguntungkan pada pekerjaan-pekerjaan tertentu, karena memiliki sifat antara lain:

- a. Murah.
- b. Tahan lama (*durable*).
- c. Mudah dikerjakan (diaduk, diangkat, dipasang, dan diratakan).
- d. Melekat dengan baik dengan bata, batu, dan sebagainya.
- e. Cepat kering dan mengeras.

Dikarenakan sifat-sifat tersebut maka mortar memiliki cakupan yang luas untuk diaplikasikan pada berbagai macam pekerjaan seperti sebagai bahan pengikat

antara bata yang satu dengan bata yang lainnya dan juga untuk menyalurkan beban bahan bangunan (SNI, 2002).

Berdasarkan SNI 03-6882-2002, mortar dapat dibedakan atas 4 tipe, yaitu:

1. Mortar Tipe M

Mortar tipe M adalah campuran dengan kuat tekan yang tinggi yang direkomendasikan untuk pasangan bertulang maupun pasangan tidak bertulang yang akan memikul beban tekan yang besar. Kuat tekan minimumnya 17,2 MPa.

2. Mortar Tipe N

Tipe N adalah mortar yang umum digunakan untuk konstruksi pasangan di atas tanah. Mortar ini direkomendasikan untuk dinding penahan beban interior maupun eksterior. Mortar dengan kekuatan sedang ini memberikan kesesuaian yang paling baik untuk aplikasi konstruksi umumnya. Kuat tekan minimumnya adalah 12,4 MPa.

3. Mortar Tipe S

Mortar tipe ini direkomendasikan untuk struktur yang akan memikul beban tekan normal tetapi dengan kuat lekat lentur yang diperlukan untuk menahan beban besar yang berasal dari tekanan tanah. Karena keawetannya yang tinggi, mortar tipe S direkomendasikan untuk pondasi, dinding penahan tanah, dan saluran pembuangan. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

4. Mortar Tipe O

Mortar tipe O merupakan mortar dengan kandungan kapur tinggi dan kuat tekan yang rendah. Mortar tipe ini direkomendasikan untuk dinding interior

yang tidak menahan beban struktur. Kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

2.5. Air

Air adalah salah satu bahan yang penting dalam pembuatan mortar, air diperlukan agar terjadi reaksi kimia dengan semen untuk membasahi agregat dan untuk melumas agregat agar mudah dalam pengerjaannya. Air yang dapat diminum umumnya dapat digunakan sebagai bahan untuk campuran adukan. Tetapi tidak semua air dapat memenuhi syarat tersebut karena mengandung berbagai macam unsur yang dapat merugikan.

SKSNI S – 04 – 1989 – F mensyaratkan air yang dapat digunakan sebagai bahan bangunan sebagai berikut :

1. Air harus bersih.
2. Tidak mengandung lumpur, minyak dan benda terapung lainnya yang dapat dilihat secara visual.
3. Tidak mengandung benda-benda yang tersuspensi lebih dari 2 gram/liter.
4. Tidak mengandung garam-garam yang dapat larut dan dapat merusak beton (asam-asam, zat organik dan sebagainya) lebih dari 15 gram/liter. Kandungan klorida (Cl), tidak lebih dari 500 p.p.m dan senyawa sulfat tidak lebih dari 1000 p.p.m sebagai SO_3 .
5. Bila dibandingkan dengan kekuatan tekan adukan dan beton yang memakai air suling, maka penurunan kekuatan adukan dan beton yang memakai air yang diperiksa tidak lebih dari 10%.
6. Semua air yang mutunya meragukan harus dianalisa secara kimia dan dievaluasi mutunya menurut pemakainnya

2.6. Reaksi Hidrolisis

Ketika air ditambahkan ke dalam campuran semen untuk menghasilkan senyawa hidrat, maka terjadilah proses hidrasi. Fungsi dari proses hidrasi semen adalah untuk mengisi pori-pori antar agregat menjadi padatan. C_3S (*trikalsium silikat*) sangat mendorong pengembangan kekuatan tekan awal, sementara C_2S (*dikalsium silikat*) memberikan kekuatan semen yang lebih tahan lama. C_3A (*trikalsium aluminat*) berpengaruh terhadap kuat tekan sampai umur 38 hari, kemudian pengaruh ini semakin kecil pada umur berikutnya (Widojoko, 2010). Ketika C_3S dan C_2S bereaksi dengan air lagi untuk menghasilkan senyawa CSH (*kalsium silikat hidrat*) dan kalsium hidroksida $Ca(OH)_2$. Menurut (Hambali *et al*, 2013), reaksinya adalah :



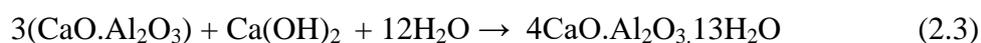
Trikalsium silikat + air \rightarrow Tobormorite + Kalsium hidroksida

Reaksi ini membantu meningkatkan kekuatan semen dan membentuk kuat tekan awal. Reaksi yang terjadi melepaskan panas, senyawa C_3S biasanya menentukan kekuatan mortar dalam 14 hari pertama.



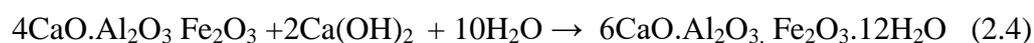
Dikalsium silikat + air \rightarrow Tobermorite + Kalsium hidroksida

Reaksi ini memberikan kekuatan semen untuk jangka waktu yang lebih lama, umumnya reaksi ini mempengaruhi kekuatan selama 14 sampai 28 hari.



Trikalsium aluminat + gypsum + air \rightarrow Kalsium hidroksida + Tobermorite

Reaksi di atas terjadi ketika semen dicampur dengan air, dan disertai dengan pelepasan panas yang tinggi. Hal ini menyebabkan pengerasan. Peristiwa ini disebut *flash set* atau *quick set*. Untuk menghindari hal ini, gypsum ditambahkan ke klinker selama proses penggilingan yang menunda proses hidrasi dan memperpanjang waktu pengerasan (*setting time*). Seperti yang terlihat dari hasil di atas, reaksi yang terjadi adalah spontan.



Tetra kalsium aluminoforit + kalsium hidroksida + air → aluminoforit hidrat

Reaksi di atas melibatkan reaksi C_4AF (*tetrakalsium aluminoferrit*) dengan gypsum untuk membentuk hidrat sulfat aluminat dan kalsium sulfit. Dari hasil di atas dapat diketahui bahwa reaksi terjadi secara spontan. Kehalusan partikel semen akan menyebabkan reaksi hidrasi yang lebih cepat dan pengerasan yang lebih cepat, yang menentukan kuat tekan mortar dan beton.

2.7. Pengujian dan Karakterisasi

Pengujian pada produk mortar meliputi :

1. Kuat Tekan

Kuat tekan suatu material adalah kapasitas suatu material dalam menahan beban atau gaya-gaya mekanis yang diberikan pada material tersebut sampai terjadinya kegagalan (*failure*) hal ini bertujuan agar dapat diketahui seberapa kuat material menerima beban tekan. Kuat tekan dapat didefinisikan sebagai kemampuan material dalam menerima gaya per satuan luas. Kuat tekan batu bata dapat diaplikasikan untuk mengukur kekuatan besarnya beban yang ditempatkan di atas

sebuah pondasi tersebut longsor atau rusak (Atmaja dkk, 2017). Alat yang digunakan untuk mengetahui besar kuat tekan pada mortar ditunjukkan pada

Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Pengujian Kuat Tekan (Sumber: Laboratorium Non-Logam Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN)

Tata cara pengujian yang umum dipakai adalah standar (ASTM C, 2001). Rumus yang digunakan untuk perhitungan kuat tekan beton dapat dilihat pada persamaan

(2.5) :

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

dimana :

P = kuat tekan (Kg/cm^2)

F = beban tekan (Kg)

A = luas penampang benda uji (cm^2)

2. Porositas

Porositas (\emptyset) dapat diartikan perbandingan antara volume ruang yang kosong (pori-pori) terhadap volume total dari suatu batuan. Pori adalah ruang di dalam batuan yang selalu terisi oleh fluida, contohnya air tawar, air asin, udara maupun gas bumi. Efektifitas pada porositas terjadi ketika bagian rongga pori-pori di dalam batuan berhubungan. Semakin meningkat kepadatan mortar maka semakin besar kuat tekan mortar, sebaliknya semakin besar porositas mortar, maka kekuatan mortar akan semakin kecil (Nurwidyanto dkk, 2006). Berdasarkan SNI 1969-2008 nilai porositas dapat dihitung dengan persamaan (2.6).

$$Porositas = \frac{m_b - m_k}{m_b - m_g} \times 100\% \quad (2.6)$$

dimana :

m_b = massa mortar setelah direndam (gram)

m_k = massa mortar kering (gram)

m_g = massa mortar dalam air di udara (gram)

Porositas dibedakan menjadi dua jenis yaitu porositas primer dan porositas sekunder. Porositas primer dapat diartikan sebagai porositas yang terjadi bersamaan batuan menjadi sedimen, sedangkan porositas sekunder merupakan porositas yang terjadi sesudah batuan menjadi sedimen bisa berupa larutan (*dissolution*) (Siswanto dan Gunarto, 2019).

3. Massa Jenis

Massa jenis merupakan pengukuran massa sebuah bahan yang dibagi dengan setiap satuan volume (Laoli dkk, 2013). Agregat dapat dibedakan berdasarkan massa jenisnya, yaitu agregat normal, agregat berat, dan agregat ringan.

- a. Agregat normal adalah agregat yang massa jenisnya antara $2,5 \text{ g/cm}^3$ sampai $2,7 \text{ g/cm}^3$. Agregat ini biasanya berasal dari agregat granit, basalt, dan sebagainya. Beton yang dihasilkan memiliki massa jenis sekitar $2,3 \text{ g/cm}^3$. Betonnya disebut beton normal.
- b. Agregat berat mempunyai massa jenis lebih dari $2,7 \text{ g/cm}^3$ misalnya magnetik (Fe_3O_4), barytes (BaSO_4), atau serbuk besi. Beton yang dihasilkan juga massa jenisnya tinggi (sampai 5 g/cm^3), yang efektif sebagai dinding pelindung sinar radiasi sinar-X.
- c. Agregat ringan mempunyai massa jenis kurang dari $2,5 \text{ g/cm}^3$ yang biasa digunakan untuk bangunan non struktural. Akan tetapi dapat pula untuk beton struktural atau blok dinding tembok (Tjokrodikuljo, 2007).

Berdasarkan SNI 1969-2008 nilai massa jenis dapat dihitung dengan persamaan (2.7).

$$\text{Massa jenis} = \frac{w_1}{w_3 - w_2} \times \rho_{air} \quad (2.7)$$

Dimana

w_1 = berat awal/kering (gram)

w_3 = berat setelah dilap dengan kain (gram)

w_2 = berat direndam dalam air (gram)

ρ_{air} = massa jenis (g/cm^3)

4. Absorpsi

Absorpsi menyatakan besarnya daya serap air dalam mortar yang diukur dengan sampel dengan mengamati laju serapan air selama waktu tertentu tanpa memberikan tekanan air pada benda uji. Faktor- faktor yang mempengaruhi besarnya absorpsi antara lain yaitu faktor air semen dan susunan butir (gradasi) agregat (Syamsuddin dkk, 2011). Besar kecilnya daya serap air sangat dipengaruhi oleh pori atau rongga yang terdapat pada benda uji maka daya serapnya semakin besar, sehingga resistansinya semakin menurun (Nasution dkk, 2020). Absorpsi berpengaruh terhadap nilai kuat tekan mortar. Rongga (pori) yang terdapat pada mortar terjadi karena kurang tepatnya kualitas dan komposisi material penyusunnya (Nurwidyanto dkk, 2006). Berdasarkan SNI 1969-2008 secara sistematis absorpsi dapat dihitung dengan perasamaan (2.8) :

$$Absorpsi = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (2.8)$$

Dimana

m_b = massa mortar setelah direndam (gram)

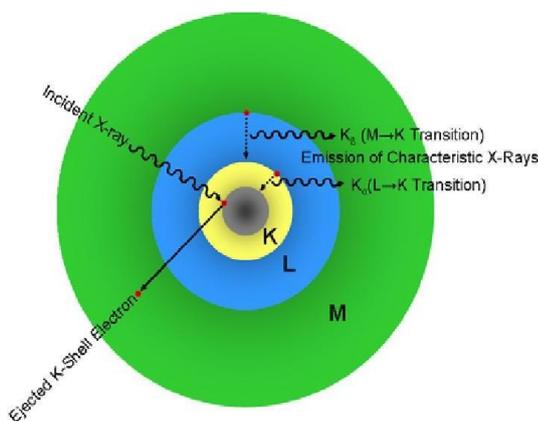
m_k = massa mortar kering (gram)

5. X-Ray Fluorescence (XRF)

Karakterisasi menggunakan XRF digunakan untuk mengetahui komposisi kimia dari semua jenis bahan. Teknik ini dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur berdasarkan pada panjang gelombang dan jumlah sinar-X yang dipancarkan kembali setelah suatu material ditembaki sinar-X berenergi tinggi.

Bahan uji berupa padat, cair bubuk, hasil penyaringan atau bentuk lainnya XRF terkadang juga bisa digunakan untuk menentukan ketebalan dan komposisi lapisan dan pelapis (Brouwer, 2010).

Dalam XRF, sumber *X-Ray* meradiasi sampel sehingga unsur-unsur yang muncul dalam sampel akan memancarkan radiasi *X-Ray* neon dan energi diskrit, seperti warna untuk cahaya optik (Brouwer, 2010) Prinsip kerja XRF ditampilkan pada Gambar 2.4.



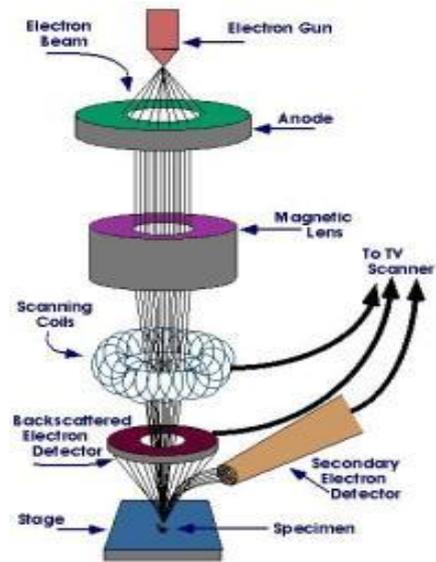
Gambar 2. 4 Prinsip kerja XRF (Atmodjo *et al.*, 2013)

Berdasarkan **Gambar 2.4** reaksi *X-Ray* terjadi selama elektron bergerak dari tingkat energi yang lebih tinggi untuk mengisi kekosongan yang diakibatkan oleh pelepasan elektron, sehingga terjadi perbedaan energi antara dua kulit yang mengakibatkan terjadinya *X-Ray*, spektrum *X-Ray* yang diperoleh selama proses tersebut terdapat sejumlah puncak energi karakteristik, energi dari puncak tersebut mengarah ke identifikasi unsur yang terjadi dalam sampel (analisis kualitatif dan intensitas puncak yang absolut konsentrasi unsur (semi-kuantitatif atau kuantitatif analisis) (Atmodjo *et al.*, 2013).

7. *Scanning Electron Microscopy* (SEM-FESEM)

Scanning Electron Microscopy (SEM) merupakan teknik karakterisasi material yang banyak digunakan untuk mengamati morfologi permukaan dan ukuran butir nanomaterial (Mursal, 2018). Batas butir, distribusi, batas fasa, tanda-tanda deformasi mekanis, dan komposisi kimia semuanya diamati dengan mikroskop elektron pemindaian (SEM), dengan perbesaran 200.00 kali, dan ketebalan yang dapat diamati 200 hingga 0,5 nm. Morfologi permukaan partikel akan terungkap dari hasil karakterisasi partikel menggunakan SEM (Mursal, 2018).

Teknik karakterisasi konvensional berdasarkan panjang gelombang 650 nm ke atas, seperti mikroskop optic dalam analisis metalografi, tidak memiliki resolusi yang cukup untuk mendapatkan informasi ilmiah yang diharapkan. Oleh karena itu, diperlukan metode identifikasi dan karakterisasi lain yang dapat memberikan resolusi lebih tinggi untuk memberikan bantuan visual kepada peneliti sehingga mereka dapat mengamati secara detail atau bahkan in-situ apa yang terjadi di dalam dan di sekitar anatarmuka antara material dan lapisan oksida. Untuk alasan ini *Scanning Electron Microscopy* (SEM) dipahami sebagai teknologi yang sesuai yang diterima dan diakui oleh komunitas riset material dunia, dan simbolnya adalah dengan menganugerahkan hadiah Nobel kepada penemunya Erns Ruska dan Max Knoll (Sujatno dkk, 2015). Prinsip kerja pada *Scanning Electron Microscopy* (SEM) ditunjukkan pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2. 5 Prinsip kerja SEM

III. METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada 29 Oktober sampai 30 November 2021 di Laboratorium Non-Logam, Laboratorium Preparasi, Laboratorium Analisis Kimia Pusat Riset Teknologi Pertambangan – BRIN.

3.2. Alat dan Bahan

3.2.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah ayakan 350 *mesh* ASTM:E11 Nakatama Scientific Type:A6-342A, timbangan digital merk *YHC Electronic balance* model 30002, gelas ukur Iwaki 100 ml, XRF tipe PANanalytical Epsilon3^{XLE}, FESEM-EDS, cetakan mortar ukuran 5x5x5 cm, ember, wadah nampan, sarung tangan dan mesin uji kuat tekan jenis *universal testing machines* (UTM) *Type* HT-2402 *capacity* 100 kN.

3.2.2 Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah *fly ash*, *bottom ash*, semen *Portland Composite Cement* (PCC), dan air.

3.3. Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan adalah perendaman mortar dalam air selama 7, 14, dan 21 hari. Sampel dikarakterisasi menggunakan XRF dan FESEM. Kemudian dilakukan uji sifat fisis pada benda uji mortar antara lain, pengujian massa jenis porositas dan absorpsi serta dilakukan uji mekanis yaitu kuat tekan mortar.

3.3.1 Karakterisasi Bahan

1) Semen

Semen diayak menggunakan ukuran 325 *mesh*, pemeriksaan semen hanya dikarakterisasi menggunakan XRF.

2) *Bottom Ash*

Bottom ash dihaluskan dan diayak menggunakan ukuran 325 *mesh*, pemeriksaan terhadap *bottom ash* yaitu dengan karakterisasi XRF.

3) *Fly Ash*

Fly ash diayak menggunakan ukuran 325 *mesh*, pemeriksaan terhadap *fly ash* yaitu dengan karakterisasi XRF.

3.3.2 Pembuatan Mortar

Langkah-langkah dalam pembuatan mortar berdasarkan ASTM C311 sebagai berikut:

1) Preparasi *Fly Ash*

Langkah-langkah dalam preparasi *fly ash* adalah:

- a. Mengayak *fly ash* menggunakan ayakan ukuran lolos 350 *mesh* untuk pembuatan mortar.

- b. Mengayak *fly ash* menggunakan ayakan ukuran lolos 350 *mesh* untuk karakterisasi bahan.

2) Pembuatan Mortar

Langkah-langkah dalam proses pembuatan mortar adalah :

- a. Menyiapkan bahan baku mortar yang terdiri dari *bottom ash*, air, semen *Portland Composite Cement (PCC)*, dan *fly ash*.
- b. Menimbang masing-masing komposisi dengan perbandingan 1:5 (semen : *bottom ash*) dengan takaran masing-masing komposisi. Massa semen di substitusi dengan *fly ash* yaitu sebesar 0 Wt%, 10 Wt%, 20 Wt%, 30 Wt%, 40 Wt%, dan 50 WT% (masing-masing komposisi dibuat 2 mortar). Kemudian memasukkannya ke dalam wadah pengaduk.
- c. Mengaduk campuran mortar dari masing-masing komposisi menggunakan *mixer*. Pengadukan dilakukan hingga merata selama ± 5 menit.
- d. Memberi air ke dalam campuran bahan mortar. Hal ini bertujuan agar komposisi yang dibuat menjadi lunak sehingga mengurangi terjadinya *cracking* atau keretakan.
- e. Setelah campuran bahan teraduk secara merata, bahan dimasukkan ke dalam alat pencetak mortar berukuran 5x5x5 cm.
- f. Mortar didiamkan selama 24 jam untuk dikelurakan dari cetakan. Kemudian dimasukkan ke dalam air rendaman (*curing*) dengan umur perendaman 7, 14, dan 21 hari.

3.3.3 Karakterisasi dan Analisis Mortar

Sampel dikarakterisasi menggunakan *X-Ray Fluorescence (XRF) Type PANalytical Epsilon3^{XLE}* dan *Field Emission Scanning Electron Microscopy (FESEM)*.

3.3.4 Pengujian Mortar

Tahap pelaksanaan pengujian beton pada penelitian ini sebagai berikut:

1). Pengujian Porositas

Adapun prosedur pengujian porositas SNI 1969-2008 sebagai berikut:

- a. Menimbang dan mencatat massa mortar dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital.
- b. Merendam mortar ke dalam air selama 24 jam, tujuannya agar permukaan benar-benar basah.
- c. Mengusap sisi permukaan mortar yang berisi air dari masing-masing komposisi menggunakan kain lap, kemudian menimbanginya pada timbangan digital untuk mencatat massa mortar setelah direndam dalam air.
- d. Menimbang mortar kembali dalam keadaan digantung dalam air dan menghitung persentase porositas dengan persamaan:

$$Porositas = \frac{m_b - m_k}{m_b - m_g} \times 100\% \quad (3.1)$$

2). Pengujian Absorpsi

Adapun prosedur pengujian porositas SNI 1969-2008 sebagai berikut:

- a. Menimbang dan mencatat massa mortar dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital.
- b. Merendam mortar ke dalam air selama 24 jam, tujuannya agar permukaan benar-benar basah.
- c. Mengusap sisi permukaan mortar yang berisi air dari masing-masing komposisi menggunakan kain lap, kemudian menimbanginya pada timbangan digital untuk mencatat massa mortar setelah direndam dalam air.
- d. Menimbang mortar kembali dalam keadaan digantung dalam air dan menghitung persentase porositas dengan persamaan:

$$Absorpsi = \frac{m_b - m_k}{m_k} \times 100\% \quad (3.2)$$

3). Pengujian Massa Jenis

Adapun prosedur pengujian porositas SNI 1969-2008 sebagai berikut:

- a. Menimbang dan mencatat massa mortar dalam keadaan kering menggunakan timbangan digital.
- b. Merendam mortar ke dalam air selama 24 jam, tujuannya agar permukaan benar-benar basah.
- c. Mengusap sisi permukaan mortar yang berisi air dari masing-masing komposisi menggunakan kain lap, kemudian menimbanginya pada timbangan digital untuk mencatat massa mortar setelah direndam dalam air.
- d. Menimbang mortar kembali dalam keadaan digantung dalam air dan menghitung persentase porositas dengan persamaan:

$$Massa\ jenis = \frac{w_1}{w_3 - w_2} \times \rho_{air} \quad (3.3)$$

4). Kuat Tekan

Pengujian kuat tekan pada mortar adalah untuk mendapatkan besarnya beban tekan maksimum yang bisa diterima oleh mortar. Prosedur pengujian kuat tekan sesuai dengan ASTM C 2001 sebagai berikut :

- a. Menyiapkan mortar yang telah diangkat dari air dan telah didiamkan selama semalam.
- b. Meletakkan mortar simetris dengan mesin uji kuat tekan.
- c. Melihat mortar saat uji kuat tekan apabila sudah hancur dan *dial* tidak naik lagi lalu mencatat beban tekan maksimum yang bisa diterima oleh benda uji.
- d. Menghitung kuat tekan dengan persamaan:

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.4)$$

3.4. Perawatan Mortar dalam Air (*Curing*)

Proses perawatan mortar dimulai dengan menyimpan benda uji dalam ruangan yang terhindar dari gangguan dan getaran selama satu hari. Hal ini dimaksudkan agar mortar dapat terbentuk dengan baik. Setelah satu hari didiamkan, maka benda uji dapat dibongkar dari cetaknya untuk selanjutnya dilakukan perawatan terhadap mortar tersebut. Perawatan mortar dalam bak berisi air ditunjukkan pada

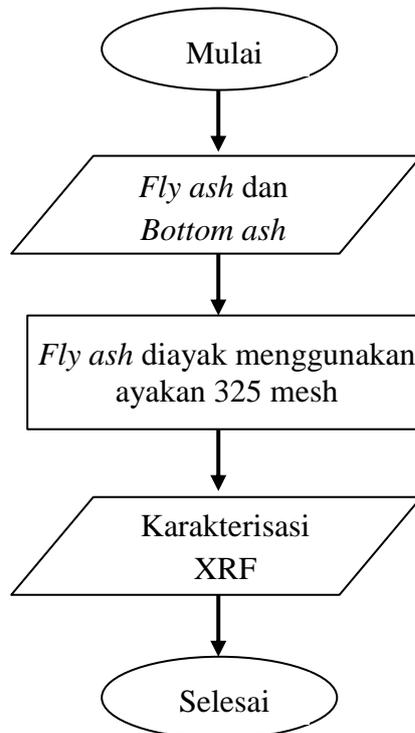
Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Perawatan Mortar dalam Air (*curing*)

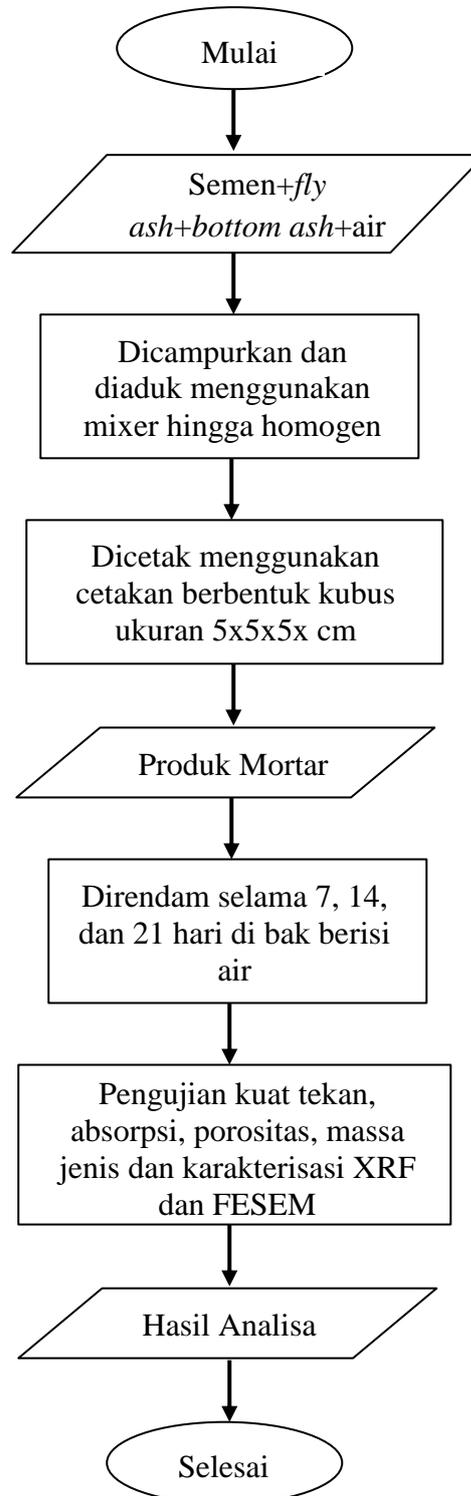
3.5. Diagram Alir

Diagram alir preparasi dan pengujian bahan baku *fly ash* dan *bottom ash* yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3. 2 Diagram alir preparasi bahan

Diagram alir pembuatan dan pengujian sampel ditunjukkan pada Gambar 3.3.



Gambar 3. 3 Diagram alir pembuatan dan pengujian sampel

V. KESIMPULAN

5.1. Kesimpulan

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

1. Substitusi *fly ash* 20 Wt% diperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar $63,74 \text{ kg/cm}^2$ dan $2,17 \text{ g/cm}^3$, serta porositas dan absorpsi terendah sebesar 19,84% dan 8,55%. Sedangkan substitusi *fly ash* 50 Wt% nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar $37,64 \text{ kg/cm}^2$ dan $1,36 \text{ g/cm}^3$, serta porositas dan absorpsi terendah sebesar 22,61% dan 10,99%.
2. Waktu perendaman selama 21 hari memperoleh nilai kuat tekan dan massa jenis tertinggi sebesar $63,74 \text{ kg/cm}^2$ dan $2,17 \text{ g/cm}^3$, serta porositas dan absorpsi terendah sebesar 19,84% dan 8,55%. Dibandingkan dengan waktu perendaman mortar selama 7, dan 14 hari.
3. Senyawa kimia SiO_2 pada *fly ash* dapat meningkatkan kekuatan pada mortar.
4. Hasil dari SEM menunjukkan pada sampel Gambar 4.6 substitusi *fly ash* 20 Wt% penyebaran pori-pori lebih merata sehingga memiliki ikatan yang lebih kuat.

5. *Fly ash* dan *bottom ash* dapat digunakan sebagai bahan substitusi semen dan bahan pengganti pasir pada pembuatan mortar.

5.2. Saran

1. Untuk memperoleh produk mortar dengan kualitas yang baik perlu dilakukan penelitian lebih lanjut dengan menggunakan substitusi *fly ash* 25 Wt% dan menggunakan bahan mineral alam seperti pasir besi dan bijih besi.
2. Kualitas mortar dengan penambahan *fly ash* perlu ditingkatkan dengan memvariasikan ukuran partikel yang tepat sebagai bahan penyusun mortar.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, R. Y. (2009). Kuat Tekan Mortar dengan Berbagai Campuran Penyusun dan Umur. *Jurnal Media Komunikasi Teknik Sipil*, Vol. 17, No. 1, hal 67-84.
- Alkhaly, Y. R., & Fedriansyah, Y. (2018). Kuat Tekan Beton yang Mengandung Abu Ampas Kopi dengan Bahan Tambahan Superplasticizer. *Teras Jurnal*, Vol. 8, No. 1, hal 360-366.
- ASTM C 494-92. (n.d.). *Standart Specification for Chemical Admixtures for Concrete*.
- ASTM C618-15. (2015). *Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use In Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- Atmaja, F. R., Triana, D., & Ujianto, R. (2017). Struktur Beton Pasca Kebakaran Terhadap Kuat Tekan dan Karakteristik Beton. *Jurnal CIVTECH*, Vol. 1, No. 1, hal 1-13.
- Atmodjo, D. P., Suryana, D., & Wibowo, H. (2013). Pengujian Unjuk Kerja Sample Holder XRF Epsilon 5. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*, Bandung.
- Baite, E., Messan, A., Hannawi, K., Tsobnang, F., & Prince, W. (2016). Physical and Transfer Properties of Mortar Containing Coal Bottom Ash Aggregates from Tefereyre (Niger). *Construction and Building Materials*, Vol. 125, page 919-926.
- Bayuseno, A. P., Widyanto, S. A., & Juwantono. (2010). Sintesis Semen Geopolimer Berbahan Dasar Abu Vulkanik Dari Erupsi Gunung Merapi. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 12, No. 4, hal 10-16.
- Brouwer, P. (2010). *Theory of XRF: Getting Acquainted With The Principles 3rd Edition*. Netherland: Panalytical B.V.

- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). *Materials Science and Engineering: An Introduction, 8th Edition*. New York: Wiley.
- Cullity, B. D., & Stock, R. S. (2001). *Elements of X-Ray Diffraction*. New Jersey: Prentice Hall.
- Dantes, K. R., & Aprianto, G. (2017). *Composite Manufacturing And Testing*. Depok: PT. Raja Grafindi Persada.
- Djiwantoro, H. (2001). *Abu Terbang Solusi Pencemaran Semen*. Jakarta: Sinar Harapan.
- Durdzinski, P. T., Dunant, C. F., Haha, M. B., & Scrivener, K. L. (2015). A New Quantification Method Based on SEM-EDS to Assess Fly Ash Composition and Study The Reaction of Its Individual Components in Hydrating Cement Paste. *Cemen and Concrete Research*, Vol. 73, pages 111-122.
- Ervianto, M., Saleh, F., & Prayuda, H. (2016). Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi Menggunakan Bahan Tambah Abu Terbang (fly Ash) dan Zat Adiktif (Bestmittel). *SINERGI*, Vol. 20, No. 3, hal 199-206.
- Fajri. (2020). Pengaruh Penambahan Serat Tali Rafia Terhadap Sifat Mekanis Mortar Geopolimer. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol.12, No. 2, hal 73-80.
- Fauzi, A., Nuruddin, M. F., Malkawi, A., & Abdullah, M. M. (2016). Study of Fly Ash Characterization as a Cementitious Material. *Procedia Engineering*, Vol. 148, page 487-493.
- Giergiczny, Z. (2019). Fly Ash and Slag. *Cement and Concrete Research*, Vol. 124.
- Hakim, Y., Kusumastuti, E., & Jumaeri. (2017). Sintesis dan Karakterisasi Geopolimer Dengan Penambahan Serat Eceng Gondok dan Serbuk Alumina. *Indonesian Journal of Chemical Science*, Vol. 6, No. 3.
- 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, No. 4, Hal 14-21.
- Hamidi, A., Aman, & Drastinawati. (2014). Pemanfaatan Abu Terbang Batubara (Fly Ash) Sebagai Bahan Batako Yang Ramah Lingkungan. *JOM Fakultas Teknik*, Vol.1, No.1.

- Hisan, A. K., Kusumastuti, E., & Mahatmanti, F. W. (2017). Pemanfaatan Serat Daun Nanas dalam Sintesis Geopolimer Berbasis Abu Layang Batubara. *Indonesian Journal of Chemical Science*, Vol. 6, No. 2.
- Idris, M., & Hasriana. (2017). Analisis Kualitas Mortar yang Ditambah Abu Terbang (Fly Ash) Sebagai Pengganti Sebagian Semen. *Prosiding Seminar Hasil Penelitian (SNP2M)*, hal 129-132.
- Indriyani, Delvianty, J., Selmina, M., Herius, A., & Noerdin, R. (2019). Fly Ash Sebagai Alternatif Pengganti Semen Pada Beton Geopolimer Ramah Lingkungan. *Prosiding Seminar Nasional Badan Standardisasi dan Kebijakan Jasa Industri*, Vol. 2, No. 2.
- Islami, A. N., Wibisono, M., & Saputra, E. (2015). Sifat-Sifat Fisik Mortar Geopolimer Dengan Bahan Dasar Campuran Abu Terbang (Fly Ash) dan Abu Sawit (Palm Oil Fuel Ash). *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik*, Vol. 2, No. 2.
- Kabir, D., Imran, & Sultan, M. A. (2018). Penggunaan Fly Ash Sebagai Bahan Tambah Pada Proses Pembuatan Mortar dengan Bahan Dasar Pasir Apung. *TECHNO*, Vol. 7, NO. 2.
- Kim, H.-K. (2015). Utilization of Sieved and Ground Coal Bottom Ash Powders As A Coarse Binder In High-Strength Mortar To Improve Workability. *Construction and Building Materials*, Vol. 9, pages 57-64.
- Kriven, W. M. (2018). Geopolymer-Based Composites. *Comprehensive Composite Materials II*, Vol. 5, Pages 269-280.
- Laoli, M. E., Kaseke, O. H., Manoppo, M., & 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 Statistik*, Vol. 1, No. 2, Hal 128-132.
- Mailvaganam, N. P., & Rixom, M. (2019). *Chemical Admixtures for Concrete 3rd Edition*. Florida: CRC Press.
- Mengxiao, S., Qiang, W., & Zhikai, Z. (2015). Comparison of The Properties Between High-Volume Fly Ash Concrete and High-Volume Steel Slag Concrete Under Temperature Matching Curing Condition. *Construction and Building Materials*, Vol. 98, pages 649-655.
- Muhardi. (2016). Karakteristik Abu Terbang dan Abu Dasar dalam Geoteknik. *Jurnal Fakultas Teknik Universitas Pasir Pengaraian*, page 18-27.

- Mulyono, T. (2003). *Teknologi Mortar dan Beton*. Yogyakarta: Andi.
- Munandar, I., Savetlana, S., & Sugiyanto. (2013). Kekuatan Tarik Serat Ijuk (Arenga Pinnata Merr). *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, Vol. 1, No. 3.
- Mursal, I. L. (2018). Karakterisasi XRD dan SEM Pada Material Nanopartikel Serta Peran Material Nanopartikel Dalam Drug Delivery System. *Pharma Xplore: Jurnal Sains dan Ilmu Farmasi*, Vol. 2, No. 3.
- Naganathan, S., Mohamed, A. Y., & Mustapha, K. N. (2015). Performance of Brick Made Using Fly Ash and Bottom Ash. *Construction and Building Material*, Vol. 96, pages 576-580.
- Nasution, R. K., Amri, A., & Pinem, J. A. (2020). Peningkatan Sifat Mekanis Mortar Geopolimer Abu Terbang Batubara Dengan Penambahan Grafena. *Jom FTEKNIK*, Vol.7, No. 1, hal. 1-10.
- Nofrisal, & Rantesalu, S. (2020). Pengaruh Abu Terbang (Fly Ash) PLTU Sekayan Sebagai Substitusi Pengganti Sebagian Semen Pada Kuat Tekan Mortar. *Jurnal Borneo Saintek*, Vol. 3, No. 1, hal 19-27.
- Nugroho, H. (2017). Coal As the National Energy Supplier Forward: What are Policies to be Prepared? *The Indonesian Journal of Dev. Planning*, Vol. 1, No. 1.
- Nurwidyanto, M. I., Yustiana, M., & Widada, S. (2006). Pengaruh Ukuran Butir Terhadap Porositas dan Permeabilitas Pada Batupasir. *Berkala Fisika*, Vol. 9, No. 4, hal 191-195.
- Punisingon, M. A., Handono, B. D., & Pandaleke, R. (2019). Uji Eksperimental Kuat Tekan Beton Daur Ulang Dengan Bahan Tambah Abu Terbang (Fly Ash) dan Serbuk Kaca Sebagai Substitusi Parsial Semen. *Jurnal Sipil Statik*, Vol. 7, No. 1.
- Rafieizonooz, M., Mirza, J., Salim, M. R., Hussin, W. M., & Khankhaje, E. (2016). Investigation of Coal Bottom Ash and Fly Ash in Concrete as Replacement for Sand and Cement. *Construction and Building Materials*, Vol. 116, page 15-24.
- Ramzi, N. I., Shahidan, S., Maarof, M. Z., & Ali, N. (2016). Physical and Chemical Properties of Coal Bottom Ash (CBA) from Tanjung Bin Power Plant. *International Engineering Research and Innovation Symposium (IRIS)*, Vol. 160.

- Riama, G., Veranika, A., & Prasetyowati. (2012). Pengaruh H₂O₂, Konsentrasi NaOH dan Waktu Terhadap Derajat Putih Pulp Dari Mahkota Nanas. *Jurnal Teknik Kimia*, Vol. 18, No.3.
- Risdanareni, P., Puspitasari, P., & Jaya, E. J. (2017). Chemical and Physical Characterization of Fly Ash as Geopolymer Material. *MATEC Web Conferences*, Vol. 97, p. 01031.
- Rochmanto, D. (2019). *Campuran Beton Geopolimer dengan Binder Fly Ash & Gypsum*. Jawa Tengah: UNISNU PRESS.
- Rokbi, M., Osmani, H., Imad, A., & Benseddiq, N. (2011). Effect of Chemical Treatment On Flexure Properties of Natural Fiber-Reinforced Polyester Composite. *Procedia Engineering*, Vol. 10, Pages 2092-2097.
- Rumbayan, R., Nicolaas, S., & Sengkey, S. L. (2019). *Teknologi Beton*. Manado: POLIMONDO Press.
- Setiawati, M. (2018). Fly Ash Sebagai Bahan Pengganti Semen Pada Beton. *Jurnal UMJ, Seminar Nasional Sains dan Teknologi*, 1-8.
- Sihombing, A. P., Afrizal, Y., & Gunawan, A. (2018). Pengaruh Penambahan Arang Batok Kelapa Terhadap Kuat Tekan Mortar. *Jurnal Inersia*, Vol. 10, No. 1, hal 31-38.
- Simanullang, D. Y. (2014). Kajian Kuat Tekan Mortar Menggunakan Pasir Sungai dan Pasir Apung Dengan Bahan Tambahan Fly Ash dan Conplast Dengan Perawatan (Curing). *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan*, Vol. 2, No. 4, hal 621-631.
- Simatupang, P. H., Sir, T. W., & Kurniaty, A. S. (2016). Pengaruh Substitusi Parsial Semen Dengan Abu Terbang Terhadap Karakteristik Teknis Beton. *Jurnal Teknik Sipil*, Vol. 5, No.2.
- Singh, M., & Siddique, R. (2016). Effect of Coal Bottom Ash As Partial Replacement of Sand on Workability and Strenght Properties of Concrete. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 112, pages 620-630.
- Siswanto, E., & Gunarto, A. (2019). Penambahan Fly Ash dan Serat Serabut Kelapa Sebagai Bahan Pembuatan Beton. *Jurnal UkaRsT*, Vol. 3, No. 1.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-6882-2002;. (2002). *Spesifikasi Mortar Untuk Pekerjaan Pasangan*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

- Standar Nasional Indonesia (SK SNI) S-04-1989-F. (1989). *Spesifikasi Bahan Bangunan Bagian A (Bahan Bnagunan Bukan Logam)*. Bandung: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 03-2493-1991. (1991). *Metoda Pembuatan dan Perawatan Benda Uji Beton Di Laboratorium*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 15-2049-2004. (2004). *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 1961-2008. (2008). *Cara Uji Berat Jenis dan Penyerapan Air Agregat Kasar*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Standar Nasional Indonesia (SNI) 2049:2015. (2015). *Semen Portland*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Suarnita, I. W. (2011). Kuat Tekan Beton dengan Aditif Fly Ash Ex. PLTU Mpanau Tavaeli. *Jurnal SMARTek*, Vol. 9 No. 1, hal 1-10.
- Sujatno, A., Salam, R., Bandriyana, & Dimyati, A. (2015). Studi Scanning Electron Microscopy (SEM) Untuk Karakterisasi Proses Oksidasi Paduan Zirkonium. *Jurnal Forum Nuklir*, Vol. 9, No. 2, Hal 44-50.
- Sujivorakul, C., Jaturapitakkul, C., ASCE, A., & Taotip, A. (2011). Utilization of Fly Ash, Rice Husk, and Palm Oil Fuel Ash in Glass Fiber-Reinforced Concrete. *Journal of Materials In Civil Engineering*, Vol. 23, page 1281-1288.
- Suparno, O. (2020). Potensi dan Masa Depan Serat Alam Indonesia Sebagai Bahan Baku Aneka Industri. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, Vol. 2, hal 221-227.
- Susilowati, A., Simanullang, K. A., & Aprilia, L. (2016). Bata Beton (Paving Blok) Geopolimer Dengan Variasi Konsentrasi Serat Sabut Kelapa. *Jurnal Poli-Teknologi*, Vol. 15, No. 1.
- Syafri, R., Nazara, F. R., & Nasution, H. (2016). Analisa pH, TSS dan Warna Dalam Proses Pengolahan Air Limbah Pulp Dan Kertas Menggunakan Koagulasi Fly Ash. *Prosiding 1th Celscitech-UMRI*, Vol. 1, hal 17-20.
- Syamsuddin, R., Wicaksono, A., & M, F. F. (2011). Pengaruh Air Laut pada Perawatan (Curing) Beton Terhadap Kuat Tekan dan Absorpsi Beton Dengan Variasi Faktor Air Semen dan Durasi Perawatan. *Jurnal Rekayasa Sipil*, Vol. 5, No. 2.

- Takim, Naibaho, A., & Ningrum, D. (2016). Pengaruh Penambahan Abu Terbang (Fly Ash) Terhadap Kuat Tekan dan Penyerapan Air Pada Mortar. *Jurnal Reka Buana*, Vol. 1, No. 2.
- Tjokrodinuljo, K. (2007). *Teknologi Beton*. Yogyakarta: KMTS FT UGM.
- Wenoo, R., Wallah, S. E., & Pandaleke, R. (2014). Kuat Tekan Mortar Dengan Menggunakan Abu Terbang (Fly Ash) Asal PLTU Amurang Sebagai Substitusi Semen. *Jurnal Sipil Statik*, Vol. 2, No. 5, hal 252-259.
- Wibowo, M. T. (2007). Pengaruh Penambahan Trass Muria Terhadap Kuat Tekan, Kuat Tarik dan Serapan Air Pada Mortar. *Skripsi*, Universitas Negeri Semarang.
- Widjojoko, L. (2010). Pengaruh Sifat Kimia Terhadap Unjuk Kerja Mortar. *Jurnal Teknik Sipil UBL*, Vol.1, No. 1, Hal 52-59.
- Wijayanto, S. O., & Bayuseno, A. P. (2014). Analisis Kegagalan Material Pipa Ferrule Nickel Alloy N06025 Pada Waste Heat Boiler Akibat Suhu Tinggi Berdasarkan Pengujian: Mikrografi dan Kekerasan. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 2, No. 1.
- Witjaksana, B., Sarya, G., & Widhiharto, H. (2016). Pembuatan Batu Bata Tanpa Bakar Dengan Campuran Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium Silikat (Na₂SiO₃). *JHP Jurnal Hasil Penelitian*, Vol. 1, No. 1.
- Zheng, Y., Wang, J., Zhu, Y., & Wang, A. (2015). Research and Application of Kapok Fiber As An Absorbing Material : A Mini Review. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 27, Pages 21-23.
- Zuraidah, S., & Hastono, B. (2017). Serbuk Kapur Sebagai Cementitious Pada Mortar. *Jurnal Rekayasa Teknik Sipil Universitas Madura*, Vol. 2, No. 1.