

**PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN
MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN
UTILIZATION OF FLY ASH AND BOTTOM ASH WASTE FOR
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MATERIALS.**



HIKARI KHALILAH TJARONGE

D012231050

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024



**PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL
RAMAH LINGKUNGAN**

HIKARI KHALILAH TJARONGE

D012231050



PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

**UTILIZATION OF FLY ASH AND BOTTOM ASH WASTE FOR
ENVIRONMENTALLY FRIENDLY MATERIALS**

HIKARI KHALILAH TJARONGE

D012231050



CIVIL ENGINEERING MASTER STUDY PROGRAM

FACULTY OF ENGINEERING

UNIVERSITAS HASANUDDIN

GOWA

2024

PENGAJUAN TESIS

**PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL
RAMAH LINGKUNGAN**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

HIKARI KHALILAH TJARONGE

D012231050

Kepada

PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

2024

TESIS**PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK
BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN****HIKARI KHALILAH TJARONGE
D012231050**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Tesis yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi pada Program Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin pada tanggal 14 November 2024 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama



Dr. Eng. M. Asad Abdurrahman ST., M. Eng
NIP. 198604092019043001

Pembimbing Pendamping



Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge ST., M. Eng
NIP. 196805292002121002

Dekan Fakultas Teknik
Universitas Hasanuddin

Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT., IPM., AER
NIP. 19730926 200012 1002

Ketua Program Studi
S2 Teknik Sipil

Dr. Ir. M. Asad Abdurrahman, ST., M. Eng. PM. IPM
NIP. 19730306 199802 1001

PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, skripsi berjudul "PENGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN" adalah benar karya saya dengan arahan dari pembimbing (Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng sebagai Pembimbing Utama dan Prof. Dr. M. Wihardi Tjaronge, S.T., M.Eng sebagai Pembimbing Pendamping). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka skripsi ini. Sebagian dari isi tesis ini telah dipublikasikan pada seminar 5th International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICCEE) 2024 di Kuala Lumpur sebagai artikel dengan judul "*Unveiling the Compressive Strength and Environmental Impact of Mortar Made With Fly Ash and Bottom Ash as Fine Aggregate*". Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan skripsi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa skripsi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, 28 November 2024



Hikari Khalilah Tjaronge
D012231050

KATA PENGANTAR

Dengan segala kerendahan hati, penulis menyampaikan puji dan syukur kehadirat Allah SWT, karena atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan tesis ini, yang merupakan salah satu syarat akademik untuk menyelesaikan studi magister pada Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Dalam tulisan ini penulis menyajikan pokok bahasan menyangkut masalah dibidang transportasi, dengan judul: **“PENGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN”** yang merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi Magister pada Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Kami menyampaikan penghargaan sangat tinggi dan mendalam kepada berbagai pihak yang telah membantu melewati semua proses penyusunan Tesis ini, terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin.
2. Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, ST., MT, IPM, ASEAN.Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Prof. Dr. Ir. H. Muh. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dan selaku pembimbing II yang selalu memberikan arahan dan petunjuk dalam penyusunan Tesis ini.
4. Dr. Eng. M. Akbar Caronge, ST., M.Eng selaku pembimbing I yang telah meluangkan waktu dan pengarahan dalam proses penyusunan Tesis ini.
5. Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT., Dr. Ir. Muh. Asad Abdurrahman, ST., M.Eng. PM, IPM, selaku penguji.
6. Serta seluruh dosen, staff dan karyawan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
7. Teman-teman Eco Material 20231 yang selalu menemani dalam penyelesaian penulisan tesis ini
8. Orang Tua Tercinta Wihardi Tjaronge dan Nur Indah yang selalu memberi motifasi dan bantuan baik moril maupun materil serta adik-adik tercinta.

Yang istimewa penulis persembahkan kepada:

1. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada kedua orang tua saya tercinta, khususnya ayah saya, Prof. Dr. Ir. H. M. Wihardi Tjaronge, ST, M.Eng, dan Ibu saya, Nur Indah, SE, atas doa, kasih sayang, dan dukungan yang telah diberikan selama ini, baik secara spiritual maupun material. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada seluruh keluarga besar atas dorongan dan nasihat yang telah diberikan.
2. Saudara-saudari tercinta Megumi, Wirda, Yusuf, Umar dan Fatimah yang selalu memberikan semangat dalam penyelesaiannya tugas akhir ini.
3. Sahabat saya Jihan, Rufi, Nabila, dan Nida yang selalu menemani dalam suka dan duka dari mahasiswa baru hingga ada di titik ini.

4. Seluruh rekan di Laboratorium Riset Eco Material dan rekan kantor di PT. Bumi Karsa, yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

Penulis mengakui bahwa semua ciptaan manusia pada dasarnya memiliki kekurangan; oleh karena itu, ia berharap para pembaca dapat memberikan masukan untuk meningkatkan kualitas dan orisinalitas tugas akhir ini.

Sebagai penutup, semoga Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan berkat dan karunia-Nya kepada kita semua, dan semoga tugas akhir ini terbukti sangat bermanfaat, khususnya di bidang Teknik Sipil.

Gowa, 18 November 2024

Penulis,

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'H' shape with a horizontal line extending to the right, and a smaller, looped signature below it.

Hikari Khalilah Tjaronge

ABSTRAK

HIKARI KHALILAH TJARONGE. PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN

(dibimbing oleh Dr.Eng.M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan senyawa oksida fly ash dan bottom ash sesuai untuk digunakan sebagai agregat halus. Hasilnya, penggabungan keduanya secara signifikan meningkatkan produksi beton dan mortar dengan fungsionalitas yang diperlukan. Pada penelitian ini, bagian dari upaya bersama untuk mengurangi masalah lingkungan yang disebabkan oleh peningkatan signifikan dalam produksi abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*) di seluruh dunia, serta masalah lingkungan yang disebabkan oleh eksploitasi pasir sungai alam yang berlebihan dalam beberapa dekade terakhir. Interaksi fisik antara fly ash dan bottom dengan pasir alam dipelajari dengan menyelidiki korelasi antara besarnya beban eksternal yang diberikan dan durasi pembebanan dari pembebanan awal hingga titik kegagalan spesimen mortar yang mengeras. Hasil pada penelitian ini, menunjukkan bahwa mortar yang terdiri dari fly ash dan bottom ash menunjukkan kekakuan yang lebih unggul dan tegangan tekan puncak dibandingkan dengan mortar normal. Namun, perilaku getas mortar tetap tidak terpengaruh oleh penggunaan fly ash dan bottom ash sebagai agregat halus. Analisis kuantitatif tegangan tekan selama fase elastis dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai fase elastis menemukan bahwa mortar yang terbuat dari fly ash dan bottom ash juga memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan dengan mortar normal. Temuan lain menunjukkan bahwa mortar yang terdiri dari fly ash dan bottom ash melampaui Mortar Normal dalam hal Toughness_{CS-time}. Hasil penelitian juga, menunjukkan dari sudut pandang penurunan emisi CO₂, semua campuran yang mengandung fly ash dan bottom ash memiliki PGWP/f'c yang lebih baik dibandingkan mortar normal.

Kata Kunci: abu terbang, abu dasar, pasir alam, tegangan tekan, GWP

ABSTRACT

HIKARI KHALILAH TJARONGE. **PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN**

(guided by Dr.Eng. M. Akbar Caronge. S.T.,M.Eng, dan Prof. Dr.. Muh. Wihardi Tjaronge. S.T., M.Eng).

Numerous research have demonstrated that the physical properties and oxide compounds of fly ash and bottom ash are appropriate for utilization as fine aggregates. As a result, the integration of both significantly improves the effectiveness of concrete and mortar in achieving the requirements that are needed. This study is a part of a concerted effort to reduce the environmental problems caused by the significant increase in fly ash and bottom ash production worldwide, as well as the environmental problems caused by the overexploitation of natural river sand in recent decades. The physical interactions between fly ash, bottom ash, and natural sand were studied by investigating the correlation between the magnitude of the exerted external load and the loading duration from the initial loading up to the failure point of the hardened mortar specimen. Experimental results have shown that mortars composed of fly ash and bottom ash exhibit superior rigidity and peak compressive stress compared to normal mortar. However, the brittle behavior of the mortar remains unaffected by the use of bottom ash and fly ash as fine aggregate. A quantitative analysis of the compressive stress during the elastic phase and the time it took to reach the elastic phase discovered that the mortar made from bottom ash and fly ash also has superior performance compared to normal mortar. Another finding exposed that the mortar composed of fly ash and bottom ash surpasses the normal mortar in terms of Toughness_{SCS-time}. The findings also indicate that, in terms of mitigating CO₂ emissions, all combinations including fly ash and bottom ash exhibit superior PGWP/*f*_c compared to conventional mortar.

Keywords: fly ash, bottom ash, natural sand, compressive stress, GWP

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
BAB I.....	15
PENDAHULUAN.....	15
1.1. Latar Belakang	15
1.2. Rumusan Masalah	17
1.3. Tujuan Penelitian.....	17
1.4. Manfaat Penelitian	17
1.5. Batasan Masalah	17
1.6. Sistematika Penulisan.....	18
BAB II.....	19
TINJAUAN PUSTAKA.....	19
2.1 Mortar	19
2.2 Semen.....	23
2.3 Agregat halus dan Material Pozzolan.....	26
2.4 Air.....	34h
2.5 Kuat Tekan Mortar	36
2.6 Toughness.....	37
2.7 Dampak Lingkungan	38
2.8 Pola Retak dan Kehancuran	39
2.9 Penelitian terdahulu	40
BAB III.....	43
METODE PENELITIAN.....	43
3.1. Metode Penelitian	43
3.2. Tempat dan Waktu Penlitian.....	46
3.3. Lokasi Penelitian	46
3.4. Alat dan Bahan Penelitian	46
3.5. Pemeriksaan Karakteristik Material	48
3.6. Pembuatan Benda Uji	48

3.7.	Evaluasi Flow pada Mortar.....	49
3.8.	Perawatan (Curing) pada Mortar.....	50
3.9.	Evaluasi Kuat Tekan.....	50
3.10.	Indikator Emisi CO ₂	52
BAB IV		55
HASIL DAN PEMBAHASAN		55
4.1.	Karakteristik Fisik	55
4.2.	Oxide compound	55
4.3.	Morfologi Fly Ash dan Bottom Ash	56
4.4.	Kinerja Semen Campuran	57
4.5.	Analisa Emisi C	57
4.6.	Flow Test Mortar.....	58
4.7.	Hubungan Fly Ash dan Bottom Ash terhadap Kuat Tekan.....	59
4.8.	Hubungan antara tegangan tekan dan waktu.....	60
4.9.	Hubungan antara tegangan tekan yang dinormalkan dengan waktu	61
4.10.	Waktu Menuju Waktu Fase Elastis	63
4.11.	Toughness CS-time	64
4.12.	Pengaruh Fly Ash dan Bottom Ash pada GWP dan PGWP/f'c.....	65
4.13.	Pengaruh Fly Ash dan Bottom Ash pada GWP dan PGWP/f'c per flow	67
4.14.	Pola Retak.....	68
BAB V KESIMPULAN		70
DAFTAR PUSTAKA		71

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Pengaplikasian Mortar	19
Gambar 2. Proses terbentuknya <i>fly ash</i> dan <i>bottom ash</i>	33
Gambar 3. Hubungan tegangan dan regangan	37
Gambar 4. Area Toughness di bawah kurva tegangan-regangan	38
Gambar 5. Pola kehancuran	40
Gambar 6. Bagan Alur Penelitian	45
Gambar 7. Material mortar	47
Gambar 8. Pemeriksaan Flow Test	50
Gambar 9. Curing air benda uji	50
Gambar 10. Pengujian Kuat Tekan	52
Gambar 11. Morfologi Fly Ash	56
Gambar 12. Morfologi Bottom Ash	56
Gambar 13. Flow Mortar	58
Gambar 14. Kuat Tekan Mortar	59
Gambar 15. Hubungan antara tegangan tekan dan waktu	60
Gambar 16. Hubungan antara tegangan tekan ternormalisasi dengan waktu	61
Gambar 17. Waktu untuk mencapai fase elastis dan tegangan tekan pada fase elastis	63
Gambar 18. Ketangguhan berdasarkan hubungan antara tegangan tekan dan waktu	64
Gambar 19. Korelasi antara GWP dan P_{GWP/f_c} dalam berbagai campuran	65
Gambar 20. Korelasi antara GWP dan $P_{GWP/flow}$ dalam berbagai campuran	67
Gambar 21. Pola Retak Mortar normal	68
Gambar 22. Pola Retak Mortar 100% BA	68
Gambar 23. Pola Retak Mortar 90% BA 10% FA	69
Gambar 24. Pola Retak Mortar 80% BA 20% FA	69
Gambar 25. Pola Retak Mortar 70% BA 30% FA	69

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Spesifikasi proporsi mortar (SNI 03-6882-2014).....	20
Tabel 2. Panduan untuk Memilih Pasangan Mortar.....	21
Tabel 3 Persyaratan spesifikasi properti mortar	23
Tabel 4. Persyaratan kimia utama (SNI 15-2049-2004)	24
Tabel 5. Mineral utama dalam klinker semen Portland.....	25
Tabel 6. Persyaratan Kimia Fly Ash	31
Tabel 7. Persyaratan Fisik Fly Ash.....	32
Tabel 8. Sifat Fisik Khas Bottom Ash.....	34
Tabel 9. Pemeriksaan karakteristik fly ash dan bottom ash.....	48
Tabel 10. Pemeriksaan karakteristik pasir.....	48
Tabel 11. Rancangan campuran mortar dalam 1m ³	49
Tabel 12. Karakteristik Fisik	55
Tabel 13. Komposisi Kimia	56
Tabel 14. Perhitungan dampak lingkungan dari bahan semen.....	57
Tabel 15. Nilai dampak lingkungan dari masing-masing material penyusun mortar	57

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Meningkatnya jumlah penduduk di wilayah metropolitan memerlukan penyediaan fasilitas tambahan, seperti perumahan yang memadai. Selama beberapa dekade, mortar semen telah dipandang sebagai bahan yang bermanfaat untuk bangunan dinding dan rumah karena efektivitas biaya, kemudahan produksi dan penggunaan, dan ketersediaan komponen penting di daerah setempat.

Produksi mortar yang terbuat dari semen terhidrasi mudah dilakukan, seperti halnya produksi bahan penyusunnya, khususnya zat semen atau semen Portland, bersama dengan pasir sungai atau partikel yang lolos saringan no. 4 dari pengolahan batu pecah. Kedua proses ini mudah dilakukan. Bahan-bahan ini dapat ditemukan di berbagai lokasi karena tersedia secara luas dan berfungsi sebagai agregat halus. Mortar digunakan untuk berbagai aplikasi, termasuk tetapi tidak terbatas pada yang berikut: merekatkan pasangan batu, memplester permukaan pasangan batu bata, mengamankan pasangan batu sungai atau gunung untuk pondasi rumah atau tanggul, merekatkan pasangan batu untuk saluran irigasi, drainase, dan berbagai aplikasi mortar semen lainnya.

Meskipun penggunaan mortar memiliki banyak manfaat dalam bidang pekerjaan konstruksi sipil, namun produksi mortar tersebut belum sepenuhnya ramah lingkungan. Hal ini dikarenakan salah satu komponennya yaitu pasir yang harus ditambang. Akibatnya, penggunaan mortar yang meluas akan berdampak pada lingkungan akibat penambangan pasir. Apabila kegiatan penambangan pasir dari sungai jika dilakukan secara terus-menerus akan berdampak buruk pada area penambangan dan sekitarnya. Salah satu akibat dari penambangan pasir yang tidak terkendali dapat mengakibatkan lebar sungai dan bantaran sungai terganggu sehingga menjadi salah satu faktor penyebab terjadinya tanah longsor dan banjir. Selain itu, akan terjadi peningkatan tingkat kekeruhan yang akan berdampak pada biota di sepanjang sungai yang merupakan lokasi yang dimanfaatkan untuk penambangan pasir dan batu. Penambangan pasir di sekitar tiang jembatan dan abutmen akan mengakibatkan terjadinya pengikisan sedimen atau pasir di sekitar pondasi tiang jembatan dan abutmen yang dapat membahayakan umur jembatan. Perlu adanya bahan agregat halus alternatif yang dapat mengurangi jumlah pasir atau batu yang diambil dari sungai agar dapat turut serta dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan.

Selain sebagai sumber energi utama, listrik juga merupakan komponen penting dalam pertumbuhan ekonomi, serta dalam kegiatan sehari-hari masyarakat dan operasional bisnis. Oleh karena itu, PLTU yang juga disebut sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Uap merupakan salah satu

metode pembangkitan listrik yang efisien dan ramah lingkungan. Hal ini dilakukan guna memenuhi permintaan energi listrik yang terus meningkat. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang mengandalkan bahan bakar batubara untuk operasinya. Selain itu, pembakaran batu bara akan menghasilkan abu dasar dan abu terbang yang secara bersamaan akan memberikan kontribusi terhadap pencemaran udara melalui emisi karbon dioksida (CO_2). Sebagian besar abu terbang dan abu dasar selama ini tertimbun di kolam penampungan. Jumlah abu terbang dan abu dasar yang tertimbun di kolam penampungan akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya kebutuhan energi listrik. Di sisi lain, jumlah fasilitas penampungan yang tersedia saat ini semakin berkurang. Baik fly ash maupun bottom ash berpotensi memberikan dampak buruk terhadap lingkungan jika tidak dikelola dengan baik. Misalnya, fly ash berpotensi terbawa ke daerah pemukiman atau perairan, sehingga membahayakan kesehatan penduduk dan biodata perairan.

Beberapa penelitian telah menunjukkan bahwa karakteristik fisik dan senyawa oksida fly ash dan bottom ash sesuai untuk digunakan sebagai agregat halus. Hasilnya, penggabungan keduanya secara signifikan meningkatkan produksi beton dan mortar dengan fungsionalitas yang diperlukan. Namun, saat ini terdapat kekurangan penyelidikan eksperimental yang menilai substitusi pasir alam dengan penggunaan fly ash dan bottom ash secara bersamaan sebagai agregat halus dalam pembuatan mortar. Karena keadaan tersebut, penelitian ini menggunakan fly ash dan bottom ash dalam pembuatan mortar dan melakukan eksperimen kuat tekan pada mortar yang mengeras untuk menguji interaksi fisik antara fly ash, bottom ash, pasir alam, dan semen hidrolik.

Hal utama suatu bahan padat yang menandakan kualitasnya adalah kekuatan tekannya. Mekanisme kegagalan tekan mortar yang dipengaruhi oleh komposisi bahan baku yang digunakan pada dasarnya menunjukkan kekuatan dan kekokohan mortar. Berbagai penelitian mengeksplorasi korelasi yang melibatkan besarnya kekuatan eksternal yang diberikan dan durasi yang diperlukan agar proses dapat berlangsung. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk meningkatkan pemahaman tentang perilaku benda padat ketika ditempatkan di bawah kekuatan eksternal.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki masalah ekologi yang muncul sebagai akibat dari peningkatan produksi fly ash dan bottom secara global, serta masalah lingkungan yang diperburuk oleh penggunaan pasir alam yang berlebihan dalam beberapa tahun terakhir. Ini adalah bagian dari inisiatif yang lebih luas untuk mengurangi kekhawatiran ini. Studi ini dirancang untuk memahami interaksi fisik antara fly ash, bottom dan pasir alam melalui penyelidikan hubungan antara beban eksternal yang diterapkan dan durasi pembebanan dari awal pembebanan hingga titik kegagalan pada spesimen mortar yang diperkeras..

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah “ **Penggunaan Limbah Fly Ash Dan Bottom Ash Untuk Bahan Material Ramah Lingkungan** ”

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang diatas maka, permasalahan yang ingin diselesaikan dirumuskan sebagai berikut :

1. Masalah perilaku sifat fisik bottom ash dan fly ash sebagai alternatif agregat halus pada mortar.
2. Masalah perilaku kuat tekan mortar kombinasi bottom ash dan fly ash sebagai pengganti agregat halus pada mortar.
3. Masalah pengaruh dampak lingkungan mortar kombinasi bottom ash dan fly ash sebagai pengganti agregat halus pada mortar.

1.3. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan yang diharapkan dari penelitian ini, yaitu :

1. Menganalisis sifat fisik bottom ash dan fly ash pada penelitian ini.
2. Menganalisis perilaku kuat tekan kombinasi bottom ash dan fly ash sebagai alternatif sebagai pengganti agregat halus.
3. Menganalisis dampak lingkungan dari mortar kombinasi bottom ash dan fly ash sebagai alternatif pengganti agregat halusterhadap indikator parameter sustainabilitas.

1.4. Manfaat Penelitian

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terkait dengan manfaaat mengenai sifat-sifat mortar dan dampak lingkungan terhadap variasi substitusi abu terbang (*fly ash*) dan abu endapan (*bottom ash*) sebagai alternatif pasir. Selain itu, penelitian ini berupaya untuk meneliti dampak penggantian pasir terhadap kekuatan tekan mortar.

1.5. Batasan Masalah

Berikut adalah Batasan masalah dalam penulisan proposal ini, Dimana dibatasi oleh beberapa hal sebagai berikut:

1. Fly ash yang digunakan adalah kelas F yang merupakan abu terbang kadar kalsium rendah.
2. Bottom ash yang digunakan adalah kelas C yang merupakan abu endapan kalsium rendah.
3. Portland Composite Cement (SNI) yang merupakan jenis semen campuran merupakan jenis semen yang digunakan.
4. Untuk mengurangi jumlah pasir yang digunakan dalam campuran mortar, fly ash dan bottom ash digunakan sebagai pengganti.
5. Cetakan uji berbentuk kubus dengan dimensi 50 mm x 50 mm x 50 mm. digunakan untuk penelitian.

6. Pada kondisi curing air, kuat tekan dilaksanakan pada umur 7 hari dan pada umur 28 delapan hari.
7. Pemeriksaan dilakukan di laboratorium yang sesuai dengan standar resmi, dan hasil pemeriksaan yang diharapkan harus diperoleh.
8. Perhitungan parameter lingkungan GWP terhadap flow dan kuat tekan.

1.6. Sistematika Penulisan

Dalam penulisan teks, diskusi hasil uji laboratorium terhadap **PENGGUNAAN LIMBAH FLY ASH DAN BOTTOM ASH UNTUK BAHAN MATERIAL RAMAH LINGKUNGAN**, penulis memberikan gambaran mengenai garis besar dan menjelaskan secara ringkas tentang sistematika penulisan hasil studi diuraikan dalam komposisi bab-bab sebagai berikut:

Bab I Pendahuluan

Dalam bab ini, penulis akan menjelaskan uraian tentang latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan.

Bab II Tinjauan Pustaka

Dalam bab ini, penulis akan mengemukakan tentang fly ash, bottom ash, semen, agregat halus, air, kuat tekan, *Toughness*, Hubungan Tegangan-Regangan, Indikator Sustainabilitas Lingkungan dan penelitian terdahulu.

Bab III Metodologi Penelitian

Pada bab ini penulis akan menjelaskan rincian penelitian, tempat dan waktu penelitian, metode pengumpulan data, bahan penelitian, alat penelitian, pelaksanaan penelitian dan bagan organisasi penelitian.

Bab IV Hasil Penelitian dan Pembahasan

Dalam bab ini penulis akan mengemukakan tentang hasil penelitian dan pembahasan mengenai tujuan penelitian dari penulis.

Bab V Kesimpulan dan Saran

Dalam bab ini penulis akan menguraikan tentang kesimpulan dan saran-saran.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Mortar

2.1.1 Definisi Mortar dan Penggunaannya

Mortar merupakan gabungan yang proporsional antara semen hidrolis, air, dan agregat halus atau pasir . Secara umum, berfungsi sebagai plester dengan mengisi celah dan ruang di antara bata yang disusun pada dinding rumah. Selain itu, mortar dapat digunakan sebagai adhesif untuk batu sungai atau batu gunung dalam pembuatan fondasi atau dinding penahan yang berkesinambungan. Tujuan mortar adalah untuk melapisi susunan bata, yang pada gilirannya memberikan perlindungan terhadap elemen-elemen, termasuk hujan dan sinar matahari langsung. Selain itu, mortar dapat digunakan sebagai adhesif keramik untuk berbagai pekerjaan konstruksi, termasuk konstruksi dinding dan perataan tanah. Untuk menilai kemampuan mortar dalam mengikat bata atau keramik, serta ketahanannya terhadap pelapukan, kualitas atau kekuatan campuran mortar adalah faktor penentu karakteristik ini. Seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**, mortar dapat digunakan untuk mengikat berbagai material, termasuk batu sungai dan bata.

Semen dan agregat dicampur dengan air setelah dicampur bersama untuk membuat mortar dan beton. Penting untuk memahami kepadatan, porositas, dan kekuatan tekan bahan yang digunakan dalam konstruksi. Penting juga untuk mengetahui sifat mortar dalam kaitannya dengan panas. Misalnya, dinding yang dibangun dari mortar memiliki konduktivitas yang berbeda dari bahan bangunan lainnya, yang terkait erat dengan penggunaan bahan bangunan.



Gambar 1. Pengaplikasian Mortar

2.1.2 Jenis-JenisqMortar

Berdasarkan SNI 03-6882-2014, definsi dan standar penggunaan jenis-jenis moratar diperlihatkan pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1 Spesifikasi proporsi mortar (SNI 03-6882-2014)

Mortar	Tipe	campuran dalam volume (bahan bersifat semen)					Rasio agregat (pengukuran pada kondisi lembab dan gembur)
		semen portland/ semen giling	semen pasangan			kapur padam atau kapur pasta	
			M	S	N		
kapur semen	M	1		
	S	1	...	...	...
	N	1	...	...	...
	O	1	...	...	...
Semen	M	1	1		2 1/4 - 3 kali jumlah volume bahan bersifat semen
	M	...	1	...	...
	S	1,2	...	...	1	
	S	...	...	1	...	
	N	...	...	...	1	
	O	...	...	...	1	

Tabel 2. Panduan untuk Memilih Pasangan Mortar

Lokasi	Bagian Bangunan	Tipe Mortar	
		Rekomendasi	Alternatif
bagian luar, di atas level	dinding pemikul beban	N	S atau M
	dinding bukan pemikul beban sandaran dinding	O	S atau M
		N	S
bagian luar, di bawah level	pondasi, dinding, dinding pemikul beban, manhole, sumur, jalan, setapak	S	M atau N
bagian dalam	Dinding pemikul beban, Partisi bukan pemikul beban	N	S atau M
		O	N
Bagian luar dan dalam	Dekoratif	O	N

Menurut ASTM C270 – 14a, Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, mortar untuk adukan pasangan dapat dibedakan atas 5 tipe, yaitu:

a. Mortar tipe M

Mortar ini sangat cocok digunakan untuk pasangan dinding bertulang maupun tidak bertulang yang akan memikul beban berat. Mortar Tipe M biasanya terdiri dari campuran semen Portland, pasir halus, dan air dalam proporsi yang dirancang untuk mencapai kekuatan minimum sekitar 17,2 MPa. Mortar Tipe M juga sering digunakan dalam aplikasi di bawah tanah dan di lingkungan yang mungkin terpapar kelembapan tinggi atau kondisi ekstrem lainnya.

b. Mortar tipe S

Material mortar ini memiliki kekuatan tekan minimum 12,4 Mpa, Mortar ini dikenal memiliki kekuatan ikatan yang tinggi, menjadikannya sangat efektif dalam menahan tekanan dari tanah, angin, dan beban gempa. Oleh karena itu, Mortar Tipe S direkomendasikan untuk aplikasi di bawah tanah maupun di permukaan, seperti pada dinding penahan, fondasi, saluran pembuangan, dan manhole. Mortar ini sangat cocok untuk proyek-proyek yang memerlukan stabilitas struktural dan ketahanan terhadap beban lateral yang besar.

c. Mortar tipe N

Mortar Tipe N adalah jenis mortar yang umum digunakan dalam konstruksi, terutama untuk aplikasi di atas tanah. Mortar ini memiliki kekuatan tekan sedang, dengan nilai berkisar antara 5,2 hingga 12,4 Mpa Mortar Tipe N direkomendasikan untuk berbagai aplikasi,

termasuk dinding penahan beban baik di interior maupun eksterior. Kekuatan dan fleksibilitasnya menjadikannya pilihan yang baik untuk proyek yang membutuhkan daya dukung yang memadai tanpa memerlukan kekuatan maksimum seperti pada Mortar Tipe M.

d. Mortar tipe O

Mortar Tipe O adalah jenis mortar dengan kekuatan tekan yang rendah, sekitar 350 psi (2,4 MPa), dan umumnya digunakan untuk aplikasi interior yang tidak menahan beban struktural. Komposisi Mortar Tipe O terdiri dari satu bagian semen Portland, dua bagian kapur terhidrasi, dan sembilan bagian pasir. Kombinasi ini memberikan mortar sifat elastis dan fleksibel, menjadikannya ideal untuk dinding non-load-bearing dan pekerjaan perbaikan pada struktur yang ada.

e. Mortar tipe K

Mortar tipe K menunjukkan kekuatan tekan dan kekuatan ikatan lentur yang jauh berkurang. Jarang digunakan dalam konstruksi baru, mortar khusus ini secara khusus disarankan dalam ASTM C270 untuk tujuan membangun bangunan yang sudah ada, yang biasanya menggunakan mortar kapur. Kekuatan tekan terendahnya adalah 5,2 MPa.

Spesifikasi untuk sifat mortar diuraikan dalam tabel sesuai dengan SNI 6882-2014 :

Tabel 3 Persyaratan spesifikasi properti mortar

Mortar	Tipe	Kekuatan tekan rata-rata pada umur 28 hari, min, MPa (psi)	Retensi air, min, %	Kadar udara, maks, % ^B	Rasio agregat (diukur dalam kondisi lembab, lepas)
Semen-kapur	M	17,2 (2 500)	7 5	12 12	Tidak kurang dari 2¼ dan tidak lebih dari 3½ jumlah dari volume-volume terpisah dari material sementisius
	S	12,4 (1 800)	7 5	14 C	
	N	5,2 (750)	7 5	14 C	
	O	2,4 (350)	7 5		
Semen mortar	M	17,2 (2 500)	7 5	12 12	
	S	12,4 (1 800)	7 5	14 C	
	N	5,2 (750)	7 5	14 C	
	O	2,4 (350)	7 5		
Semen pasangan	M	17,2 (2 500)	7 5	18 18	
	S	12,4 (1 800)	7	20	
	N	5,2 (750)	5	D	
	O	2,4 (350)	7 5	20 D	

2.2 Semen

2.2.1 Jenis-JenisqSemen

Pada SNI 15-2049-2004, dinyatakan bahwa proses produksi semen hidrolik melibatkan penggilingan terak semen Portland. Prosedur ini diperlukan untuk produksi semen. Komponen utama semen adalah kristal senyawa kalsium sulfat, yang jumlahnya dapat bervariasi dari satu hingga beberapa. Komponen utama semen adalah kalsium silikat hidrolik, yang digiling dengan bahan pelengkap. Semen sebagian besar digunakan dalam konstruksi. Selain itu, berbagai

macam bahan pelengkap dapat dipadukan ke dalam formulasi semen. Semen merupakan material penting dalam konstruksi, dan klasifikasinya bervariasi berdasarkan komposisi, sifat, dan standar, termasuk yang ditetapkan oleh Standar Nasional Indonesia (SNI).

Adapun jenis dan penggunaan semen adalah sebagai berikut:

1. Semen Portland Biasa (OPC) merupakan jenis yang paling banyak digunakan, cocok untuk konstruksi umum dan memiliki ciri-ciri kekuatan dan daya tahan. Semen ini sering digunakan dalam beton, mortar, dan plester.
2. Semen Portland Pozzolana (PPC) menggabungkan OPC dengan material pozzolan, meningkatkan ketahanannya terhadap serangan kimia dan membuatnya ideal untuk struktur dan pondasi laut.
3. Semen Alumina Tinggi (HAC) mengandung proporsi alumina yang lebih tinggi, memungkinkan perolehan kekuatan yang cepat, sehingga cocok untuk aplikasi suhu tinggi seperti pengecoran.

2.2.2 Komposisi Semen Portland (SNI 15-2049-2004)

Tabel 4. Persyaratan kimia utama (SNI 15-2049-2004)
Satuan dalam %

No.	Uraian	Jenis semen portland				
		I	II	III	IV	V
1	SiO ₂ , minimum		20,0 ^(b,c)			
2	Al ₂ O ₃ , maksimum		6,0			
3	Fe ₂ O ₃ , maksimum		6,0 ^(b,c)	-	6,5	-
4	MgO, maksimum	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
5	SO ₃ , maksimum Jika C ₃ A ≤ 8,0 Jika C ₃ A > 8,0	3,0 3,5	3,5 ^{d)}	3,5 4,5	2,3 ^{d)}	2,3 ^{d)}
6	Hilang pijar, maksimum	5,0	3,0	3,0	2,5	3,0
7	Bagian tak larut, maksimum	3,0	1,5	1,5	1,5	1,5
8	C ₃ S, maksimum ^{a)}	-	-	-	35 ^{b)}	-
9	C ₂ S, minimum ^{a)}	-	-	-	40 ^{b)}	-
10	C ₃ A, maksimum ^{a)}	-	8,0	15	7 ^{b)}	5 ^{b)}
11	C ₄ AF + 2 C ₃ A atau ^{a)} C ₄ AF + C ₂ F , maksimum		-	-	-	25 ^{b)}

Pada **Tabel 4**. Memperlihatkan persyaratan kimia utama berdasarkan SNI 15-2049-2004. Klinker semen merupakan komponen penting dalam produksi semen Portland, yang terbentuk melalui pemanasan bahan baku seperti batu kapur dan tanah liat pada suhu tinggi, biasanya sekitar 1450°C dalam tanur putar. Hasilnya adalah material padat yang terutama terdiri dari empat fase mineral utama: alit (trikalsium silikat, Ca_3SiO_5), belit (dikalsium silikat, Ca_2SiO_4), trikalsium aluminat ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$), dan kalsium aluminoforit ($\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_2\text{O}_5$). Mineral-mineral ini sangat penting untuk menentukan kekuatan dan karakteristik pengikatan semen yang diproduksi.

Sifat fisik klinker meliputi tekstur granular dan berat jenis sekitar 3,15, yang membuatnya padat dan getas 1. Klinker sangat reaktif; bila dicampur dengan air, bereaksi membentuk kalsium silikat hidrat (C-S-H) dan kalsium hidroksida (CH), yang bertanggung jawab atas kekuatan dan ketahanan beton 2. Kehalusan klinker secara signifikan memengaruhi laju hidrasinya; partikel yang lebih halus menyediakan area permukaan yang lebih besar, yang mengarah pada waktu pengerasan yang lebih cepat dan pengembangan kekuatan yang ditingkatkan 1.

Proses pembuatan melibatkan beberapa tahap: setelah bahan baku dihancurkan dan digiling, bahan tersebut dimasukkan ke dalam tanur tempat bahan tersebut mengalami pembakaran, melepaskan karbon dioksida dan membentuk kapur. Kapur ini kemudian bereaksi dengan silika untuk menghasilkan senyawa silikat yang penting bagi klinker 36. Setelah ini, klinker yang didinginkan digiling dengan gipsum untuk mengendalikan waktu pengerasan semen 2.

Singkatnya, klinker bukan hanya produk sampingan tetapi bahan penting yang menentukan kualitas semen. Komposisi dan sifatnya sangat penting dalam menentukan karakteristik kinerja beton, menjadikannya fokus penting dalam penelitian akademis dan standar industri. Pada **Tabel 5**. Menampilkan mineral utama dalam klinker semen portland.

Tabel 5. Mineral utama dalam klinker semen Portland

Rumus Kimia	Nama Mineral	Singkatan	Jumlah (%)	Batas (% berat)
3CaOSiO_2 atau, Ca_3SiO_5	Alite	C_3S	57	45-65
2CaOSiO_2 atau, Ca_2SiO_5	Belite	C_2S	16	10-30
$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ atau, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	Aluminate	C_3A	9	5-12
$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ atau, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	Ferrite	C_4AF	10	6-12

2.3 Agregat halus dan Material Pozzolan

2.3.1 Agregat Halus

Sekitar 75% dari total kandungan beton dan mortar terdiri dari agregat, termasuk agregat kasar dan halus, bersama dengan sekitar 75% mortar yang terdiri dari agregat halus. Pengaruh elemen ini pada karakteristik agregat berdampak signifikan pada kekuatan beton dan mortar, serta daya tahannya (termasuk ketahanan terhadap cuaca, usia, dan zat agresif). Efektivitas biaya agregat kasar dan halus dibandingkan dengan semen menyebabkan pemanfaatannya dalam campuran beton dan mortar pada proporsi maksimum yang memungkinkan. Jumlah agregat yang digunakan dikontrol sesuai dengan ukuran dan komposisi campuran agregat, yang menentukan proporsi agregat halus dan kasar.

Agregat yang lebih halus, sering dikenal sebagai pasir, adalah material yang dapat melewati saringan No. 4, yang berdiameter lebih kecil dari 3/16 inci (5 mm). Agregat kasar batu pecah atau kerikil mengacu pada material yang lebih besar dari saringan No. 4. Mayoritas konstruksi beton dan mortar menggunakan agregat alami yang memenuhi kriteria yang ditetapkan. Material pasir yang digunakan sebagai agregat halus harus bebas dari lumpur dan kotoran. Batu pecah dari jenis yang terkelupas dan terbelah dicirikan oleh bentuknya yang persegi panjang, bukan yang datar dan panjang. Pengurangan kandungan pori mortar akan menghasilkan peningkatan kekuatannya.

Beberapa pengujian yang dilakukan untuk mengetahui karakteristik agregat halus meliputi:

- Analisa Ayakan: Untuk mengetahui gradasi atau distribusi ukuran butir agregat halus.

- Pengujian Berat Jenis dan Penyerapan Air: Untuk menentukan berat jenis (SSD, semu, dan bulk) serta persentase penyerapan air agregat halus.
- Pemeriksaan Modulus Kehalusan: Untuk mengetahui tingkat kehalusan agregat halus.
- Pengujian Kadar Lumpur: Untuk menentukan persentase kandungan lumpur dalam agregat halus.
- Pengujian Kandungan Organik: Untuk mengetahui ada tidaknya kandungan zat organik dalam agregat halus yang dapat mempengaruhi kekuatan beton dan mortar.
- Diameter maksimum agregat:
 - 1) Agregat halus yang dihasilkan terdiri dari pasir alam yang dihasilkan dari pemecahan batu secara alami atau pasir buatan yang dihasilkan oleh alat pemecah batu, dengan ukuran butiran 5 mm.;
 - 2) Pasir standar sebagaimana dimaksud dalam standar ini adalah pasir kuarsa alam yang mempunyai struktur butiran dan sifat-sifat tertentu yang sesuai untuk pengujian semen portland.

Agregat halus harus memenuhi persyaratan di bawah ini:

- 1) agregat halus harus dengan indeks memiliki kekerasan $\leq 2,2$;
- 2) Butiran agregat halus harus tahan lama, artinya tidak retak atau terurai dalam kondisi cuaca, seperti sinar matahari yang terik dan hujan;
- 3) Karakteristik tahan lama, sebagaimana ditentukan dengan pengujian dengan larutan garam sulfat yang sepenuhnya jenuh, adalah:
 - (1) Tingkat kerusakan maksimum yang dicapai dengan Natrium Sulfat adalah 12%;
 - (2) Ketika Magnesium Sulfat digunakan, jumlah maksimum material yang hancur adalah 10%.
- 4) Agregat halus tidak boleh melebihi 5% kandungan lumpur, diukur pada berat kering. Lumpur adalah material yang dapat ditembus oleh saringan 0,060 mm. Setelah kandungan lumpur melampaui 5%, agregat perlu dicuci;
- 5) Uji warna Abrams-Herder harus digunakan untuk memastikan bahwa agregat halus tidak mengandung bahan organik dalam jumlah berlebihan. Jika agregat halus direndam dalam larutan NaOH 3%, cairan yang terlihat di atas endapan tidak boleh berwarna lebih gelap dari larutan yang sesuai. Selain itu, agregat halus yang tidak lolos uji warna ini tetap dapat digunakan, dengan ketentuan bahwa kuat tekan campuran agregat pada umur 7 dan

28 hari minimal 95% dari kuat tekan campuran agregat yang sama yang dicuci dalam larutan NaOH 3% kemudian dibilas bersih dengan air pada umur yang sama;

- 6) Konfigurasi ekstensif butiran agregat halus memiliki modulus kehalusan berkisar antara 1,5 sampai 3,8 dan harus terdiri dari butiran-butiran dengan ukuran yang sama. Bila dikenai susunan saringan yang ditentukan, Agregat halus harus terdiri dari butiran dengan ukuran yang seragam dan sesuai dengan zona susunan butiran 1, 2, 3, atau 4 sebagaimana ditetapkan oleh SKBI/BS.882. Gradasi yang baik membantu mengoptimalkan kepadatan dan mengurangi jumlah bahan pengikat yang diperlukan dalam campuran. Material tersebut harus memenuhi kriteria berikut:
 - (1) Sisa di atas ayakan 4,8 mm: Maksimum 2% berat. Ini memastikan bahwa agregat tidak mengandung butiran besar yang dapat mempengaruhi kekuatan dan stabilitas.
 - (2) Sisa di atas ayakan 1,2 mm: Minimum 10% berat. Hal ini penting untuk memastikan adanya cukup butiran yang lebih besar untuk memberikan kekuatan.
 - (3) Sisa di atas ayakan 0,30 mm: Minimum 15%. Ini membantu menjaga proporsi butiran halus dalam campuran. Sisa di atas ayakan 4,8 mm, harus maksimum 2% berat;
- 7) Untuk mencapai tingkat ketahanan yang tinggi pada mortar, reaksi pasir terhadap alkali harus negatif. Ini penting untuk mencegah reaksi alkali-silika (ASR);
- 8) Pasir laut tidak boleh digunakan sebagai agregat halus pada mutu mortar apa pun, kecuali jika diarahkan secara khusus oleh lembaga inspeksi material yang diakui;
- 9) Agregat halus yang digunakan untuk plesteran dan aplikasi mortar harus memenuhi kriteria tersebut di atas (pasir pemasangan).

2.3.1.1 Standar pasir

Standar pasir pengujian untuk semen portland dan fly ash adalah pasir kwarsa alam yang berbentuk bulat, bersih, dan keras yang memenuhi kriteria berikut.

- 1) Persentase minimum kandungan silika (SiO_2): 95,0%
- 2) Kandungan silika terlarut (SiO_2) maksimum dalam HCl adalah 0,25%.
- 3) Kandungan bahan organik, relatif terhadap standar warna: lebih transparan daripada warna yang ditentukan.
- 4) Total kandungan lumpur: 0,0%
- 5) Komposisi butiran, terdiri dari lubang-lubang berukuran 1,2 hingga 0,6 mm, total: 100%.

2.3.2 Material Pozzolan

Bahan pozzolan didefinisikan berdasarkan komposisinya, yang dapat meliputi silika, alumina-silika, atau kombinasinya. Bahan pozzolan pada dasarnya tidak mengalami peningkatan kekakuan setelah berinteraksi dengan air. Meskipun demikian, ketika dihaluskan dan terkena air, bahan tersebut berinteraksi dengan kalsium hidroksida ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) terlarut pada suhu sekitar. Reaksi ini memfasilitasi sintesis senyawa kalsium silikat dan kalsium aluminat, sehingga meningkatkan kekuatan. Senyawa yang dihasilkan selama pengerasan bahan hidrolis identik dengan yang ditentukan di sini.

Konstituen utama zat ini adalah silikon dioksida reaktif (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3), yang meliputi pozzolan. Komponen yang tersisa terdiri dari berbagai oksida, termasuk oksida besi (Fe_2O_3). Jumlah kalsium oksida reaktif yang memfasilitasi proses pengerasan sangat sedikit. Persentase massa silikon dioksida reaktif di bawah 25,0% menurut massa dianggap tidak dapat diterima..

2.3.3 AbuqTerbang (fly ash)

Fly ash atau Abu terbang mengacu pada material sisa yang dihasilkan dari pembakaran batu bara melalui pengendapan debu partikel dari gas buang dalam tungku pembakaran, baik dengan cara elektrostatis maupun mekanis. Abu terbang terdiri dari dua jenis, yang pertama mengandung silika (bersifat silika) dan karenanya memiliki sifat pozzolan. Kategori abu terbang kedua secara inheren berkapur, memiliki sifat pozzolan dan karakteristik hidraulik. Bila waktu pembakaran adalah satu jam, kehilangan massa yang terjadi akibat pembakaran (juga dikenal sebagai kehilangan penyalaan, atau Lol) harus berada dalam batasan berikut:

- 1) 0% hingga 5% berdasarkan massa;
- 2) 2% hingga 7% berdasarkan massa;
- 3) 4,0% hingga 9,0% berdasarkan massa dari total

Pada catatan pengemasan atau pengiriman, spesifikasi Batas Maksimum Pencantuman (Lol) untuk abu terbang, yang merupakan komponen penting dalam produksi semen, harus dinyatakan dengan cara yang jelas dan ringkas. Pembatasan jumlah residu karbon yang tidak terbakar yang ada dalam abu terbang adalah persyaratan Lol dimaksudkan untuk diterapkan. Akibatnya, cukup untuk menetapkan, melalui kuantifikasi langsung residu karbon yang tidak terbakar, bahwa jumlah karbon yang tidak terbakar berada dalam kisaran yang telah ditentukan.

2.1.2.2 AbuqTerbang (fly ash) Jenis Siliceous

Serbuk halus yang seluruhnya terdiri dari partikel bulat menunjukkan karakteristik pozzolanik dominan yang ditemukan

dalam abu terbang silika yang mengandung silika. Aluminium oksida (Al_2O_3) dan silikon dioksida (SiO_2) merupakan komponen utama komposisi zat ini. Silikon dioksida (SiO_2) terdiri dari silikon dioksida. Bahan sisa terdiri dari oksida besi (Fe_2O_3) bersama dengan banyak senyawa lain yang digabungkan bersama. Persentase massa kalsium oksida reaktif (CaO) harus di bawah 10%, dan persentase massa kalsium oksida bebas tidak boleh melebihi 1,0%. Kedua persyaratan tersebut harus dipenuhi. Abu terbang dengan kandungan kalsium oksida bebas yang melebihi satu persen tetapi kurang dari dua setengah persen massa diperbolehkan, asalkan persyaratan ekspansi (resistensi) tidak melampaui 10 milimeter saat dievaluasi dengan campuran yang terdiri dari tiga puluh persen massa abu terbang silika dan tujuh puluh persen massa semen CEM, sesuai dengan EN 197-1. Agar bahan tersebut dianggap dapat diterima, bahan tersebut harus mengandung setidaknya 25,0% massa silikon dioksida reaktif.

2.3.3.1 Abu Terbang Berkapur (Calcereous Fly Ash)

Abu terbang berkapur adalah kapur berpartikel halus yang memiliki karakteristik hidraulik dan/atau pozolan. Komposisi produk ini terutama terdiri dari kalsium oksida reaktif (CaO), silikon dioksida reaktif (SiO_2), dan aluminium oksida (Al_2O_3). Bahan sisa terdiri dari oksida besi (Fe_2O_3) dan berbagai senyawa lainnya. Kandungan kalsium oksida reaktif harus setidaknya 10,0% berdasarkan massa. Persentase massa kalsium oksida reaktif dalam abu terbang berkapur berkisar antara 10,0% hingga 15,0%, sedangkan proporsi minimum silikon dioksida reaktif adalah 25,0% berdasarkan massa. Kekuatan tekan abu terbang berkapur murni, yang mengandung lebih dari 15,0% berdasarkan massa kalsium oksida reaktif, harus setidaknya 10,0 MPa setelah 28 hari saat diuji mengikuti protokol EN 196-1. Sebelum pengujian, abu terbang harus dihancurkan menjadi bubuk halus dan kekasarannya, sebagaimana diukur dengan saringan basah 40 μm , harus berada dalam kisaran 10% hingga 30% massa.

2.3.3.2 Kategori abu terbang (fly ash)

Menurut ASTM C618-05 mengkategorikan abu terbang ke dalam tiga kelas berbeda: kelas N, kelas F, dan kelas C, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 7. Konsentrasi minimum senyawa SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 di kelas N dan kelas F adalah 70%, sedangkan di kelas C berkisar antara 50% hingga 70%. Akibatnya, konsentrasi kalsium oksida (CaO) dalam abu terbang kelas N dan F agak rendah dibandingkan dengan kelas C, di mana konsentrasi CaO melebihi 10%.

Berdasarkan standar ASTM C618-03, fly ash adalah produk sampingan dari pembakaran batubara yang digunakan sebagai bahan tambahan dalam campuran mortar. Standar ini mengklasifikasi fly ash umumnya dibedakan berdasarkan kandungan kimia dan sifat fisiknya. Berikut adalah penjelasan mengenai klasifikasi fly ash::

Berdasarkan kelas, berikut adalah penjelasan mengenai klasifikasi fly ash:

1. Kelas N : Pozzolan alami atau pozzolan yang telah mengalami proses kalsinasi.
2. Kelas F : Fly ash yang dihasilkan dari pembakaran batubara antrasit atau bituminus, dengan kadar CaO lebih dari 10%.
3. Kelas C : Fly ash yang dihasilkan dari pembakaran batubara lignit atau sub-bituminus, dengan kadar CaO kurang dari 10%.

Fly ash harus memenuhi persyaratan komposisi kimia yang ditetapkan dalam ASTM C618-03, seperti pada **Tabel 6** sebagai berikut:

Tabel 6. Persyaratan Kimia Fly Ash

Komponen Kimia	Kelas N	Kelas F	Kelas C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	Min 70%	Min 70%	Min 50%
SO_3	Max 4%	Max 5%	Max 5%
Kadar Air	Max 3%	Max 3%	Max 3%
Loss on Ignition (LOI)	Max 10%	Max 6%	Max 6%

Penjelasan Kandungan Kimia

1. Silika (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), dan Besi (Fe_2O_3): Kombinasi dari ketiga oksida ini harus memenuhi persyaratan minimum untuk memastikan sifat pozzolanik fly ash. Kelas F dan N memerlukan total minimum 70%, sedangkan Kelas C memerlukan minimum 50%.
2. Kalsium Oksida (CaO): Kadar CaO yang tinggi pada Kelas C memberikan sifat semen tambahan, sedangkan Kelas F memiliki kadar CaO yang lebih rendah.
3. Sulfat (SO_3): Harus dalam batas maksimum untuk mencegah reaksi yang dapat merusak mortar.
4. Kadar Air: Kadar air maksimum yang diizinkan adalah 3%, untuk memastikan kualitas fly ash yang baik.

5. Loss on Ignition (LOI): Persentase LOI yang tinggi menunjukkan adanya bahan organik atau material yang tidak terbakar, yang dapat mempengaruhi kualitas fly ash.

Fly ash juga harus memenuhi persyaratan karakteristik fisik tertentu, yang meliputi seperti **Tabel 7**:

Tabel 7. Persyaratan Fisik Fly Ash

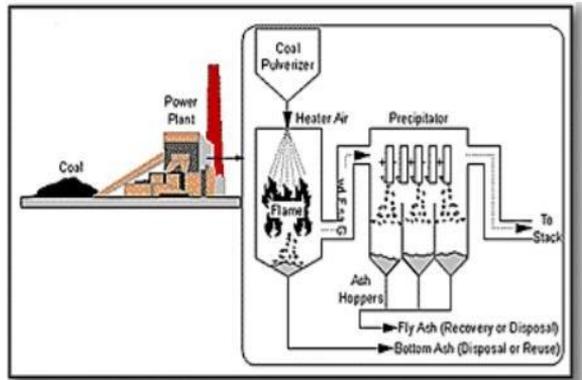
Karakteristik Fisik	Persyaratan
Fineness (lolos ayakan No. 325)	Max 34% tertahan
Indeks Aktivitas Kekuatan	Min 75% dari kontrol pada 7 dan 28 hari
Kebutuhan Air	Max 115% untuk Kelas F, Max 105% untuk Kelas C
Densitas	Max 5% variasi dari densitas rata-rata

Penjelasan Karakteristik Fisik

1. Fineness: Ukuran partikel fly ash yang halus berkontribusi pada reaktivitas dan kemampuan pengikatan. Persentase yang tertahan pada ayakan No. 325 tidak boleh melebihi 34%.
2. Indeks Aktivitas Kekuatan: Mengukur kemampuan fly ash untuk meningkatkan kekuatan beton dan mortar. Fly ash harus mencapai minimal 75% dari kekuatan kontrol pada umur 7 dan 28 hari.
3. Kebutuhan Air: Kebutuhan air maksimum untuk campuran mortar yang mengandung fly ash harus diperhatikan untuk memastikan workability yang baik.
4. Densitas: Densitas fly ash harus bervariasi dalam batas yang ditentukan untuk memastikan konsistensi dalam campuran.

2.3.4 Bottom Ash (Abu Endapan)

Bottom Ash adalah yang dihasilkan sebagai hasil samping dari pembakaran batu bara merupakan produk limbah yang jumlahnya akan terus bertambah selama industri terus memproduksi. Pembuangan limbah ini dilakukan dengan menumpuknya di lahan yang bebas dari vegetasi. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa volume campuran mengalami proses pengerasan atau hidrasi dalam jangka waktu yang telah ditentukan. (Achmad Subki Arinata, 2013)



Gambar 2. Proses terbentuknya *fly ash* dan *bottom ash*

PLTU menghasilkan Bottom Ash sebagai hasil samping dari pembakaran batu bara. Material yang dimaksud adalah produk limbah yang lebih padat daripada fly ash dan dapat dibedakan dari fly ash berdasarkan ukuran partikelnya yang lebih besar. Akibatnya, bottom ash akan terkumpul di penampung debu, yang juga dikenal sebagai ash hopper, dan selanjutnya turun ke dasar tungku pembakaran, yang disebut boiler. Langkah selanjutnya dalam proses pembuangan bottom ash dari tungku adalah dengan menyemprotnya dengan air. Selanjutnya, bottom ash dapat dibuang atau digunakan kembali sebagai material pelengkap dalam konstruksi jalan. Kedua pilihan tersebut dapat diakses. Komposisi bottom ash dapat bervariasi secara signifikan karena jenis batu bara yang digunakan dan sistem pembakaran yang digunakan, sistem yang terpasang, secara signifikan sistem yang digunakan.

Komposisi Bottom Ash bervariasi secara signifikan karena bergantung pada jenis batu bara dan mekanisme pembakarannya. Karakteristik fisik dan kimia utama Bottom Ash meliputi: Analisis karakteristik fisik Bottom Ash, termasuk bentuk, warna, tampilan, ukuran, berat jenis, berat satuan kering, dan penyerapan dalam kondisi basah dan kering *Bottom Ash* dapat dilihat pada **Tabel 8**.

Tabel 8. Sifat Fisik Khas *Bottom Ash*

Sifat fisik <i>Bottom Ash</i>	Wet	Dry
Bentuk	Angular/bersiku	Berbutir kecil/granular
Warna	Hitam	Abu-abugelap
Tampilan	Keras, mengkilap	Seperti pasir halus, sangat berpori
Ukuran (% lolosayak)	No. 4 (90 – 100%)	1,5 s/d 3/4 in (100%)
	No. 10 (40 – 60%)	No. 4 (50 – 90%)
	No. 40 (10%)	No. 10 (10 – 60%)
	No. 200 (5%)	No. 40 (0 – 10%)
Spesifik gravitasi	2,3 – 2,9	2,1 – 2,7
Spesifik gravitasi	960 – 1440 kg/m ³	720 – 1600 kg/m ³
Penyerapan	0,3 – 1,1%	0,8 – 2,0%

Komponen kimia utama abu dasar adalah silikon (Si), aluminium (Al), besi (Fe), kalsium (Ca), magnesium (Mg), sulfur (S), natrium (Na), dan beberapa elemen lainnya. Penelitian yang dilakukan oleh Moulton (1973) mengungkapkan bahwa kadar garam dan pH abu dasar yang rendah dapat menyebabkan korosi pada struktur baja saat bersentuhan dengan campuran yang mengandung abu dasar. Lebih jauh, nilai pH yang rendah, yang terlihat dari tingginya konsentrasi sulfat terlarut, menunjukkan adanya pirit (besi sulfida) dalam jumlah besar. (Achmad Subki Arinata, 2013).

2.4 Air

2.4.1 Fungsi air pada pembuatan mortar dan beton

Dalam proses produksi beton dan mortar, air merupakan komponen penting yang dibutuhkan. Mengingat beton dan mortar merupakan material komposit, air memegang peranan penting dalam proses kimia yang dilalui semen untuk membasahi agregat dan melumasi campuran agar lebih mudah dikerjakan, yang juga disebut sebagai workability beton atau mortar. Selain itu, komponen terpenting, selain agregat, yang digunakan dalam produksi beton dan mortar

adalah air. Secara umum, air minum dapat digunakan untuk produksi campuran mortar dan beton. Bila digunakan untuk campuran beton, air yang mengandung senyawa berbahaya, yang mungkin terkontaminasi garam, minyak, gula, atau bahan kimia lainnya, akan mengurangi kekuatan campuran beton secara signifikan. Selain itu, jenis air ini dapat mengubah sifat semen dan mengganggu reaksi hidrasi yang terjadi antara air dan semen untuk beton dan mortar.

Mengingat pasta semen terbentuk melalui reaksi kimia antara semen dan air, faktor krusialnya bukanlah proporsi air terhadap berat total campuran, melainkan proporsi air terhadap semen, yang terkadang dikenal sebagai Rasio Air Semen. Air yang melimpah akan mengakibatkan terbentuknya banyak gelembung air setelah proses hidrasi selesai, sedangkan air yang tidak mencukupi akan menghambat tercapainya hidrasi secara menyeluruh.

2.4.2 Spesifikasi air sebagai bahan bangunan

Air, dalam konteks ini, secara khusus menunjukkan air yang digunakan dalam pembuatan dan pemeliharaan mortar, serta untuk menekan pengapuran, mortar, dan plesteran. Air berfungsi sebagai katalis untuk reaksi hidrolisis dengan semen, sehingga memungkinkan terciptanya pasta yang pekat. Penting untuk memastikan jumlah air yang tepat yang dibutuhkan untuk memfasilitasi reaksi hidrolisis dengan semen secara efektif dan diserap oleh pori-pori agregat. Spesifikasi air sebagai bahan bangunan harus sesuai dengan kriteria berikut.:

1. Air harus bebas dari kotoran;
2. Bebas dari lumpur, minyak, dan serpihan terapung lainnya yang terlihat;
3. Bebas dari partikel tersuspensi yang melebihi 2 gram per liter;
4. Tidak mengandung melebihi 15 gram/liter garam terlarut yang berpotensi merusak mortar, seperti asam dan senyawa organik. Konsentrasi klorida (Cl) tidak boleh melebihi 500 bagian per juta (ppm) dan senyawa sulfat tidak boleh melebihi 1000 ppm sebagai SO₃;
5. Bila dibandingkan Dibandingkan dengan kuat tekan campuran dan mortar saat menggunakan air suling, penurunan kekuatan saat menggunakan air yang diuji tidak lebih dari 10%;
6. Semua air dengan kualitas yang tidak diinginkan harus menjalani analisis kimia dan kualitasnya dinilai berdasarkan tujuan penggunaannya;
7. Khusus untuk beton pratekan, kecuali syarat-syarat tersebut diatas air tidak boleh mengandung khlorida lebih dari 50 p.p.m.

2.5 Kuat Tekan Mortar

Kekuatan tekan mortar mengacu pada tingkat kekuatan tertinggi yang dapat ditahan mortar per satuan luas, diukur dalam satuan N/mm², yang sama dengan satuan MPa. Kekuatan tekan mortar atau beton ditentukan oleh komposisi kimia semen, agregat halus, air, dan bahan tambahan lainnya. Kekuatan tekan mortar geopolimer menunjukkan korelasi positif dengan usia tanah.

Berdasarkan SNI 03-6825-2002, kuat tekan mortar dapat dihitung dengan rumus :

$$f'c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

$f'c$ = Kuat tekan mortar (N/mm²)

P = Beban maksimum (N)

A = Luas penampang yang menerima beban (mm²)

2.5.1 Perilaku Tegangan-Regangan Mortar

Tegangan adalah hasil bagi gaya yang diberikan pada mortar dan luas penampang melintangnya. Regangan adalah rasio perubahan panjang (ΔL) terhadap panjang awal (L), yang direpresentasikan oleh ϵ , dan tidak berdimensi. Tegangan yang dialami dalam beton dan mortar direpresentasikan oleh persamaan di bawah.

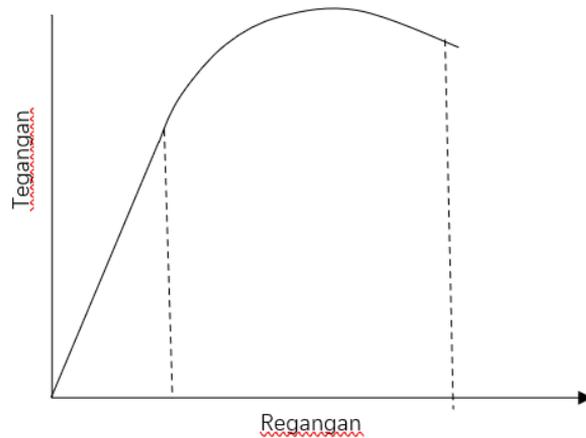
$$\epsilon = \Delta L / L \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

ΔL = perubahan panjang

L = panjang awal

Jika korelasi antara tegangan dan regangan digambarkan secara grafis, dengan tiap nilai tegangan dan regangan diplot sebagai titik, titik-titik ini akan sejajar sepanjang garis seperti yang diilustrasikan pada



Gambar 3.

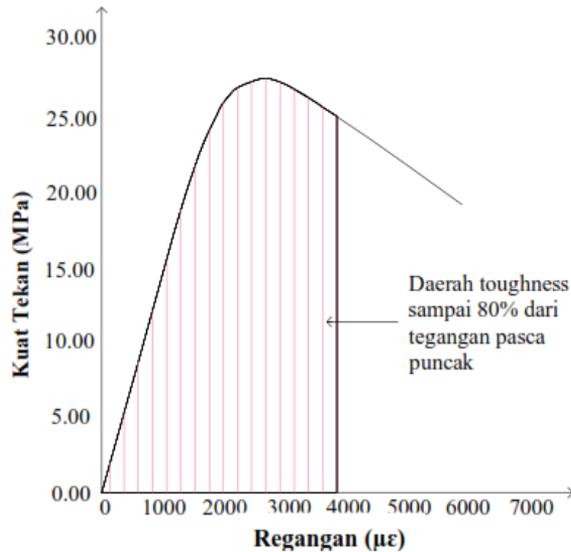
Gambar 3. Hubungan tegangan dan regangan

Dari kurva hubungan tegangan regangan beton dan mortar, dapat diindikasikan bahwa:

1. Peningkatan pada regangan puncak berbanding terbalik dengan kekuatan beton dan mortar;
2. Peningkatan pada kekuatan tekan beton dan mortar menyebabkan panjang bagian linier dari kurva akan semakin bertambah;
3. Peningkatan kekuatan beton dan mortar akan menyebabkan reduksi daktilitas.

2.6 Toughness

Toughness adalah penilaian kuantitatif terhadap kemampuan material untuk menyerap energi saat mengalami pembebanan, dan digunakan untuk menggambarkan potensi material untuk menahan fraktur. Untuk menentukan ketangguhan spesimen beton dan mortar, area di bawah kurva tegangan-regangan dihitung hingga 80% dari tegangan saat spesimen mencapai titik tertingginya (Meddah, Zitouni, dan Belâabes, 2010; Munir dkk., 2020; Yan dkk., 2022; Irmawaty dkk., 2023). Wilayah untuk menghitung ketangguhan digambarkan pada Gambar 3.



Gambar 4. Area Toughness di bawah kurva tegangan-regangan

2.7 Dampak Lingkungan

Mortar memerlukan banyak sumber daya alam, termasuk pasir atau abu batu, air, dan semen. Proses manufaktur mortar dapat melepaskan gas rumah kaca dan gas polutan yang berdampak bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Pada tahap awal manufaktur mortar, proses penggalian bahan mentah akan merubah keseimbangan ekosistem sekitar dan memicu penurunan lekatan antar material yang menyebabkan menurunnya kekuatan tanah. Selain itu, penggunaan sumber daya alam yang tidak proporsional untuk memproduksi mortar memberikan implikasi pada keberlangsungan lingkungan. Selama tahap pengadukan, pengangkutan, dan pengecoran mortar, terdapat emisi gas polutan seperti karbon monoksida, nitrogen oksida, dan gas lainnya yang menjadi hasil dari proses pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan energi. Emisi gas ini memicu polusi udara dan dampak buruk bagi manusia dan lingkungan sekitarnya. Selain itu, penggunaan air pada proses produksi mortar memicu dampak lingkungan yang tidak diinginkan, seperti penurunan kualitas air dan degradasi habitat akuatik. Pada umumnya, air dalam jumlah besar dimanfaatkan mencampur bahan mentah menjadi mortar, dan air ini kemudian harus dilepaskan ke badan air dengan mempertimbangkan volume pencemaran dan sisa-sisa bahan kimia tidak terpakai. Namun, banyak usaha untuk mengurangi dampak lingkungan dengan memproduksi mortar yang berkelanjutan, seperti penggunaan abu terbang dan abu dasar.

Parameter-parameter sustainabilitas untuk menganalisa dampak lingkungan antara lain *Global Warming Potential* (GWP). GWP

berhubungan dengan produksi gas rumah kaca, yang berasal dari emisi CO₂ dan metana, yang berkontribusi pada peningkatan suhu global dan dampak buruk pada keseimbangan ekosistem, kesehatan manusia, dan kesejahteraan material. Perubahan iklim merujuk pada fluktuasi suhu global sebagai hasil dari efek rumah kaca. Watach *et al.*, (2019) untuk menestimasi nilai dari parameter dampak lingkungan, digunakan persamaan :

$$E = \sum_{n=1}^i I_i \cdot w_i \quad (3)$$

Dimana:

- E = dampak lingkungan
- I_i = standar dampak lingkungan untuk parameter ke-i
- w_i = berat kategori ke-i (kg/m³)

Sangat penting untuk menilai kelayakan penggunaan abu terbang dan abu dasar tidak hanya pada hubungan berdasarkan satu parameter tunggal seperti jumlah abu terbang dan abu dasar kuat tekan, tapi assessment kelayakan mengadopsi dua faktor secara bersamaan. Beberapa penelitian yang memperhatikan secara simultan kuat tekan dan emisi CO₂ oleh (Vembu and Ammasi, 2023). Penelitian ini menyediakan faktor simultan yang mencakup kuat tekan dengan parameter lingkungan (GWP) seperti pada persamaan berikut :

$$P_{i-fc} \quad (4)$$

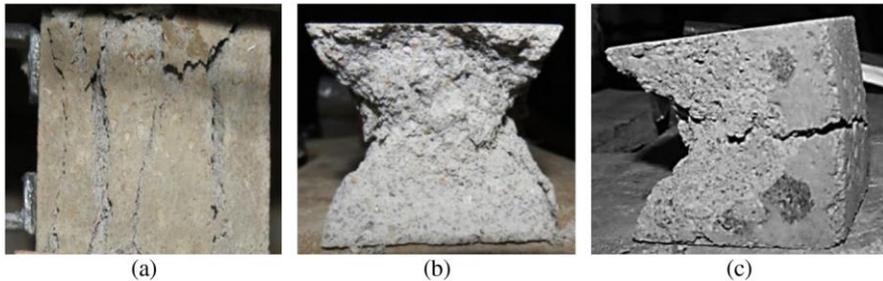
Dimana:

- P_{i-fc} = nilai total parameter dampak lingkungan parameter *i* yang diperoleh dari mix desain yang digunakan dibagi kuat tekan
- Total_{imix} = total dampak lingkungan parameter *i* yang diperoleh dari mix desain yang digunakan
- f_c = kuat tekan (MPa)

2.8 Pola Retak dan Kehancuran

Dalam penelitian Hemant B. Kaushik, Durgesh C. Rai dan Sudhir K. kuat tekan mortar kubus ditentukan dengan menggunakan benda uji kubus 50 mm sesuai dengan ASTM C109/ C109M-13 (ASTM 2013a) dan IS 2250 (BIS 1995), seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 4**. Permukaan kubus mortar dan pelat bantalan aktuator hidrolik dibersihkan untuk menghilangkan bahan yang lepas. Kubus mortar ditempatkan di tengah sedemikian rupa sehingga beban diterapkan pada permukaan yang berlawanan. Baik standar India dan ASTM merekomendasikan bahwa tidak ada bahan penutup yang digunakan untuk kubus mortar saat

pengujian di bawah beban tekan monoton uniaksial, dan rekomendasi ini diikuti dalam penelitian ini. Kegagalan dalam kubus mortar ditemukan untuk memulai oleh retakan vertikal sepanjang arah pembebanan [Gambar 5(a)], yang mengarah pada pembentukan bentuk **piramida** [Gambar 5(b)] Karena pembebanan yang tidak seragam, tekukan diamati pada beberapa spesimen, dan retakan terbentuk pada arah pembebanan yang tegak lurus [Gambar 5(c)].



Gambar 5. Pola kehancuran

2.9 Penelitian terdahulu

Dalam penelitian mereka, Young Keung Cho dan rekan-rekannya meneliti dampak komposisi kimia dari fase amorf dan kristal dari abu terbang terhadap kekuatan tekan mortar. Perkembangan kekuatan tekan dalam mortar dipengaruhi oleh variasi reaktivitas pozzolan seiring bertambahnya usia beton dan mortar. Temuan penelitian menunjukkan bahwa sifat kimia pozzolan abu terbang dipengaruhi secara signifikan oleh komponen SiO_2 , Al_2O_3 , dan Fe_2O_3 , yang merupakan kerangka fase kaca, serta komponen CaO , MgO , Na_2O , dan K_2O , yang mendepolimerisasi struktur kaca.

Dalam penelitian mereka, Ahmed Salih dkk. (2021) menerapkan berbagai teknik pemodelan untuk menilai dan mensimulasikan kekerasan mortar semen yang mengandung sejumlah besar abu terbang. Tujuannya adalah untuk mengembangkan model multiskala komprehensif yang dapat secara akurat memperkirakan kekuatan tekan mortar semen yang mengandung sejumlah besar abu terbang. Model ini dimaksudkan untuk digunakan di sektor konstruksi tanpa kendala teoritis apa pun. Untuk mencapai tujuan tersebut, analisis komprehensif dan pemodelan statistik data eksperimen (total 450 mortar semen yang diuji dimodifikasi dengan abu terbang) dari berbagai studi penelitian akademis dilakukan. Untuk mencapai tujuan ini, kami menggunakan metodologi Regresi Linier dan Nonlinier, M5P-tree, dan Jaringan Syaraf Tiruan (ANN). Dalam proses pemodelan, rasio inklusi abu terbang (kelas C dan F) (0–70% dari massa semen), rasio air terhadap pengikat (0,235–1,2), dan usia pengeringan (1 hingga 365 hari) adalah parameter

utama yang secara signifikan memengaruhi kekuatan mortar semen. Kekuatan tekan mortar semen dapat diprediksi secara akurat dengan mempertimbangkan koefisien korelasi (R), Mean Absolute Error (MAE), dan Root Mean Square Error (RMSE) dalam kaitannya dengan rasio air terhadap pengikat (w/b), kadar abu terbang, dan waktu pengeringan melalui penggunaan berbagai metode simulasi. Berdasarkan set data yang dievaluasi, analisis sensitivitas menentukan bahwa waktu pengeringan adalah faktor utama yang memengaruhi prediksi kekuatan tekan dalam mortar semen.

Menurut Fahad K. Alqahtani dkk. (2021), abu terbang (FA) umumnya digunakan sebagai pengganti sebagian semen dalam mortar/beton, biasanya sekitar 30% beratnya. Saat ini, sebagian besar FA dibuang di tempat pembuangan sampah di seluruh dunia, yang menimbulkan tantangan lingkungan. Studi eksperimental menawarkan pendekatan pragmatis dan ekonomis untuk kemungkinan penerapan abu terbang (FA) volume sangat tinggi dalam produksi tiga jenis mortar yang berbeda sebagaimana diuraikan dalam ASTM C1329. Aktivitas pozzolan FA awalnya dinilai menggunakan uji Chapelle yang diadaptasi, analisis termogravimetri, dan indeks aktivitas kekuatan. Hingga 100% semen diganti dengan FA dalam persiapan mortar, dan kuat tekan yang diinginkan dicapai dengan penyemenan dan aktivasi alkali (geopolimerisasi). Parameter seperti molaritas aktivator alkali, rasio cairan terhadap padatan, dan rasio natrium silikat terhadap natrium hidroksida diselidiki untuk menentukan dampaknya terhadap karakteristik mortar geopolimer. Kesesuaian material dengan beton konvensional dievaluasi dengan melakukan uji kekuatan tarik dan analisis kekuatan tarik pemisahan antarmuka. Analisis komprehensif dari semua jenis mortar dilakukan menggunakan spektroskopi inframerah transformasi Fourier untuk mengkarakterisasi geopolimerisasi dan sifat mekanisnya. Akhirnya, analisis komparatif dilakukan untuk menilai keberlanjutan dengan mengevaluasi indikator teknis-ekonomi-lingkungan. Studi ini menetapkan bahwa formulasi mortar geopolimer hijau adalah solusi berkelanjutan dengan kekuatan mekanis yang unggul, emisi CO₂ minimal, dan kelayakan ekonomi. Hasil menunjukkan bahwa substitusi FA 60% dapat dicapai dengan sementara, tetapi tingkat penggantian yang lebih tinggi memerlukan aktivasi alkali untuk mencapai kekuatan yang diinginkan.

Y.L. Wong dan rekan-rekannya (1999) menerbitkan sebuah studi yang meneliti dampak abu terbang pada kekuatan ikatan dan karakteristik fraktur pada antarmuka mortar semen dan agregat. Mortar diformulasikan dengan rasio air terhadap pengikat sebesar 0,3, diganti dengan abu terbang berkisar antara 15% hingga 55%. Sebuah studi dilakukan untuk menilai kekuatan lentur, ketangguhan fraktur, dan

energi fraktur dari semen biasa dan mortar semen yang dimodifikasi dengan abu terbang menggunakan blok mortar berlekuk. Kekuatan lentur, ketangguhan fraktur, dan energi fraktur antarmuka ditentukan dengan menguji konfigurasi blok berlekuk di mana kontak mortar-agregat diposisikan di atas takik. Pengujian dilakukan pada kubus antarmuka mortar-agregat untuk memastikan kekuatan pemisahan antarmuka. Substitusi abu terbang sebesar 15% terbukti meningkatkan kekuatan ikatan antarmuka dan ketangguhan fraktur. Penggantian abu terbang pada tingkat 45 dan 55% menurunkan kekuatan ikatan antarmuka dan ketangguhan fraktur setelah 28 hari. Namun, sebagian besar penurunan kembali terjadi setelah 90 hari. Pada semua tingkat yang diteliti, penggantian abu terbang mengakibatkan peningkatan energi fraktur antarmuka. Efek pozolan merupakan mekanisme utama yang menyebabkan abu terbang memengaruhi karakteristik antarmuka. Dengan meningkatnya persentase penggantian, kemajuan kekuatan ikatan antarmuka awalnya tertinggal dari kemajuan kekuatan tekan. Namun, pada tahap kehidupan selanjutnya, yang pertama melampaui yang terakhir. Penguatan antarmuka menghasilkan peningkatan kekuatan jangka panjang dan daya tahan yang luar biasa untuk beton abu terbang dengan volume kubik tinggi.

Sebuah penelitian yang dilakukan oleh Anni Susilowati pada tahun 2021 menyelidiki dampak variasi abu dasar terhadap sifat fisik dan mekanis mortar semen. Memasukkan abu dasar ke dalam agregat halus menurunkan nilai konsistensi sebesar 1,82% hingga 45,45% dibandingkan dengan nilai konsistensi tanpa abu dasar. Memasukkan 20% abu dasar ke dalam mortar semen dapat mencapai peningkatan kekuatan tekan sebesar 50% dan peningkatan kekuatan lentur sebesar 28,3% pada 28 hari, dibandingkan dengan mortar semen tanpa abu dasar. Komposisi ideal dicapai dengan menggunakan abu dasar 20%, menghasilkan kuat tekan sebesar 157,55 kg/cm² setelah 28 hari. Perhitungan ini mencakup mortar tipe S, yang memiliki kekuatan minimum 12,5 MPa menurut SNI 03-6882-2002. Secara keseluruhan, semua variasi benda uji mengalami pemuaihan susut, yang mengakibatkan perubahan panjang secara umum.