

SKRIPSI

**SINERGITAS LIMBAH BUBUK GELAS LAMPU NEON DAN
FLY ASH SEBAGAI PENGGANTI SEMEN DALAM
CAMPURAN MORTAR RAMAH LINGKUNGAN**

Disusun dan diajukan oleh:

**DHEA APRILIANTI
D131 19 1077**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2023**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI**SINERGITAS LIMBAH BUBUK GELAS LAMPU NEON DAN
FLY ASH SEBAGAI PENGGANTI SEMEN DALAM
CAMPURAN MORTAR RAMAH LINGKUNGAN**

Disusun dan diajukan oleh

Dhea Aprilianti
D131191077

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Lingkungan
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 15 Agustus 2023
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T.
NIP 19721119 200121001

Pembimbing Pendamping,



Dr. Eng. Muhammad Akbar Caronge, S.T., M.Eng
NIP 198604092019043001

Ketua Departemen Teknik Lingkungan,



Dr. Eng. Ir. Murahia Hustin, S.T., M.T., IPM.
NIP 197204242000122001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;
Nama : Dhea Aprilianti
NIM : D131191077
Program Studi : Teknik Lingkungan
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{Sinergitas Limbah Bubuk Gelas Lampu Neon dan *Fly Ash* sebagai Pengganti Semen dalam Campuran Mortar Ramah Lingkungan }

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

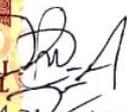
Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 15 Agustus 2023

Yang Menyatakan



Dhea Aprilianti

ABSTRAK

DHEA APRILIANTI. *Sinergitas Limbah Bubuk Gelas Lampu Neon dan Fly Ash sebagai Pengganti Mortar Ramah Lingkungan* (dibimbing oleh Irwan Ridwan Rahim dan M Akbar Caronge)

Dunia industri di Indonesia menjadi salah satu penyumbang terbesar pendapatan negara. Namun disisi lain limbah yang dihasilkan kemudian hari jika tidak dikelola dengan baik akan berdampak buruk bagi lingkungan yang salah satunya merupakan limbah kaca. Pengurangan dan daur ulang limbah adalah elemen kunci dalam kerangka pengelolaan limbah untuk mencapai pembangunan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui proses dan keefektifan penggunaan limbah gelas lampu dan *fly ash* menjadi bahan substitusi pencampuran semen serta mereduksi penggunaan bahan baku dalam pembuatan mortar yang berguna untuk mengurangi emisi CO₂. Dengan menggunakan metode penelitian yang bersifat eksperimental dan dilakukan di Laboratorium untuk melakukan pengujian seperti kuat tekan, pH dan perhitungan emisi CO₂ dengan variasi substitusi yang digunakan yaitu 0%, 5% GP, 10% GP, 15% GP, 20% GP, 5% FA dan 5% GP, 7.5% FA dan 7.5% GP, serta 10% FA dan 10% GP. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi 7.5% GP + 7.5% FA memiliki kuat tekan yang paling tinggi karena *glass powder* dan *fly ash* bertindak sebagai bahan pozzolan, sehingga pengaruh karbonasi berkurang dan daya tahan mortar meningkat. pH yang didapatkan cenderung bersifat basa yaitu berkisar antara 9-10 yang menunjukkan bahwa pH tersebut normal apabila diaplikasikan ke lingkungan karena dapat menahan kondisi cuaca yang bervariasi. Serta reduksi bahan baku yaitu menurun 21% dengan total emisi yang berhasil diturunkan sebesar 0,767 kg-CO_{2eq}/m³.

Kata Kunci: Mortar, Gelas Lampu, Abu Terbang, Emisi CO₂, Ramah Lingkungan.

ABSTRACT

DHEA APRILIANTI. *Synergy of Lamp Powder Waste and Fly Ash as a Substitute for Environmentally Friendly Mortar* (supervised by Irwan Ridwan Rahim and M Akbar Caronge)

The industrial world in Indonesia is one of the country's largest revenue contributors. However, other wastes that are produced in the future if not managed properly will have a negative impact on the environment, one of which is glass waste. Waste reduction and recycling are key elements in the waste management framework to achieve sustainable development. This study aims to determine the process and effectiveness of using waste glass and fly ash as a substitute for cement mixing and to reduce the use of raw materials in the manufacture of mortar which is useful for reducing CO₂ emissions. By using research methods that are experimental in nature and carried out in the laboratory to carry out tests such as strong pressure, pH and CO₂ emission calculations with substitution variations used, namely 0%, 5% GP, 10% GP, 15% GP, 20% GP, 5% FA and 5% GP, 7.5% FA and 7.5% GP, and 10% FA and 10% GP. The results showed that the variation of 7.5% GP + 7.5% FA has the highest compressive strength because glass powder and fly ash function as pozzolanic materials, so that the effect of carbonation is reduced and the durability of the mortar increases. The pH obtained tends to be alkaline, which ranges from 9-10 which indicates that the pH is normal when applied to the environment because it can withstand varying weather conditions. As well as the reduction of raw materials, which decreased by 21% with a total reduced emission of 0.767 kg-CO₂eq/m³.

Keywords: *Mortar, Lamp Glass, Fly Ash, CO₂ Emissions, Environmentally Friendly.*

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	ii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
DAFTAR ISI.....	vi
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL.....	ix
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	x
DAFTAR LAMPIRAN.....	xii
KATA PENGANTAR	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan.....	4
1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan.....	4
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi perancangan	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Limbah Lampu	6
1. Jumlah Limbah Lampu	6
2. Penggunaan atau Pemanfaatan Limbah Lampu dalam Dunia Konstruksi .	7
3. Identifikasi Limbah Lampu dalam B3	7
4. Karakteristik dari Limbah Lampu.....	9
5. Dampak Lingkungan dan Ekonomi dari Limbah Lampu	10
2.2 Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	10
1. Histori Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	10
2. Proses Pembentukan Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	12
3. Jenis-jenis Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	13
4. Tipe-tipe Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	14
5. Jumlah Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>) dan Masalah Terhadap Lingkungan	14
6. Sifat dan Karakteristik Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>)	15
7. Pemanfaatan Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	17
2.3 Semen.....	19
1. Proses Produksi Semen	19
2. Jenis-jenis Semen.....	19
2.4 Mortar.....	21
1. Definisi dan Penggunaan Mortar	21
2. Jenis-Jenis Mortar	22
2.5 pH dalam Mortar	23
2.6 Emisi	25
1. Emisi Karbon Dioksida (CO ₂)	25
2. Penyebab Emisi Karbon Dioksida (CO ₂).....	26
3. Dampak Emisi.....	26
4. Emisi Karbon Dioksida (CO ₂) dalam Bidang Konstruksi	27
2.7 Penelitian Terdahulu	28

	vii
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	31
3.1 Bagan Alir Penelitian	31
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	32
3.3 Metode Penelitian dan Sumber Data.....	33
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	33
3.5 Benda Uji dan Proporsi Campuran	36
3.6 Pemeriksaan Karakteristik Material.....	37
3.7 Prosedur Penelitian	39
3.8 Analisis Data	46
1. Kuat Tekan.....	46
2. Emisi (CO ₂)	47
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1 Kondisi Limbah <i>Glass Powder</i> Lampu dan <i>Fly Ash</i>	49
1. Proses Pembuatan dari Limbah menjadi Bahan Baku	49
2. Karakteristik Material	49
4.2 Pengujian Kuat tekan.....	50
4.3 Pengujian pH	52
4.4 Emisi (CO ₂)	55
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....	59
5.1 Kesimpulan	59
5.2 Saran.....	60
DAFTAR PUSTAKA	61
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Simbol Limbah B3 Beracun	8
Gambar 2 Karbonasi saat Penurunan pH	24
Gambar 3 Retak di Dinding Penahan	25
Gambar 4 Bagan Alir Penelitian	32
Gambar 5 Lokasi Penelitian	32
Gambar 6 Pembuatan Mortar	35
Gambar 7 Alat dan bahan pada tahap persiapan	39
Gambar 8 Mesin <i>Grinder</i>	39
Gambar 9 Oven dengan suhu 105°C	40
Gambar 10 Mesin Pengayak	40
Gambar 11 Saringan No. 200	40
Gambar 12 Bahan dalam Pembuatan Mortar	41
Gambar 13 Proses Penimbangan Bahan dalam Pembuatan Mortar	41
Gambar 14 Mesin <i>Concrete Mixer</i>	42
Gambar 15 Proses Memasukkan Bahan-bahan ke <i>Concrete Mixer</i>	42
Gambar 16 Pengujian <i>Flow</i>	43
Gambar 17 Pemberian Label pada Cetakan	43
Gambar 18 Perawatan (<i>Curing</i>) pada Sampel	44
Gambar 19 Gelas Piala	45
Gambar 20 Pengujian pH	46
Gambar 21 Pengujian Kuat Tekan	47
Gambar 22 Proses Limbah Lampu Menjadi <i>Glass Powder</i>	49
Gambar 23 Total Nilai Kuat Tekan Mortar	52
Gambar 24 Hasil Pengujian pada Sampel 0% GP	53
Gambar 25 Hasil Pengujian pada Sampel 5% GP + 5% FA	53
Gambar 26 Hasil Pengujian pada Sampel 7.5% GP + 7.5% FA	54
Gambar 27 Emisi pada Tahap Bahan Baku	56
Gambar 28 Persentase Penurunan Emisi	57

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jumlah Limbah Lampu di Berbagai Negara	6
Tabel 2. Kandungan yang ada dalam Kaca	9
Tabel 3. Produksi <i>Fly Ash</i> di Berbagai Negara	15
Tabel 4. Sifat Fisik dan Kimia <i>Fly Ash</i>	16
Tabel 5. Sifat Fisik dan <i>Bottom Ash</i>	16
Tabel 6. Sifat Fisik dan Kimia Semen.....	21
Tabel 7. <i>Mortar Mix Trial Glass Powder</i> sebagai Pengganti Semen.....	37
Tabel 8. Sifat Fisik dan Kimia Limbah Lampu	38
Tabel 9. Nilai Faktor Emisi Tahapan Bahan Baku.....	48
Tabel 10. Karakteristik Fisik dan Kimia Bahan Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	50
Tabel 11. Sifat Kimia Semen dan Serbuk Gelas (GP)	50
Tabel 12. Kuat Tekan Mortar	51
Tabel 13. Hasil Pengujian pH	53
Tabel 14. Rekapitulasi Pengujian pH.....	55
Tabel 15. Perhitungan Emisi pada Sampel-1	56
Tabel 16. Hasil Emisi pada Tahapan Bahan Baku	56
Tabel 17. Perbandingan Emisi dari Berbagai Penelitian.....	58

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
A	Luas Penampang Benda Uji
B3	Bahan Berbahaya dan Beracun
GP	<i>Glass Powder</i>
FA	<i>Fly Ash</i>
C	<i>Cement/Semen</i>
CO ₂	Karbon dioksida
GRK	Gas Rumah Kaca
MPA	Megapascal
N	Newton
SNI	Standar Nasional Indonesia
ASR	Reaksi Alkali-Silika
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
EN	<i>European Standard</i>
PLTU	Pembangkit Listrik Tenaga Uap
KgCO _{2e}	KG-Setara-CO ₂
kN	Kilo Newton
LHPB	Limbah Hasil Pembakaran Batubara
LVDT	<i>Linier Variable Displacement Transducer</i>
M _i	Emisi GRK setiap bahan baku per unit
CaCO ₃	Kalsium Karbonat
CaO	Kalsium Oksida
Ca(OH) ₂	Kalsium Hidroksida
CH ₄	Metana
Cr ₂ O ₃	Krom(III) Oksida
Na ₂ O	Natrium Hidroksida
TiO ₂	Titanium Dioksida
SiO ₂	Silikon Dioksida
Al ₂ O ₃	Aluminium Oksida
Al ₂ SiO ₃	Aluminium Silicate
Fe ₂ O ₃	Ferrioksida/Besi(III) Oksida
K ₂ O	Kalium Oksida
MgO	Magnesium Oksida

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
SO ₃	<i>Sulfur Trioksida</i>
Ti ₂ O ₂	Titanium Dioxide
ZrO ₂	Zirkonium Oksida
DLH	Dinas Lingkungan Hidup
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
KLHK	Kementrian Lingkungan Hidup dan Kehutanan
G	Gram
KG	Kilogram
OPC	<i>Ordinary Portland Cement</i>
Pmaks	Gaya tekan maksimum
PCC	<i>Portland Composite Cement</i>
PPC	<i>Ordinary Portland Cement</i>
Pb	Timbal
pH	<i>Potential Hydrogen</i>
PP	Peraturan Pemerintah
ppm	<i>part per million</i>
TPA	Tempat Pemrosesan Akhir
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
w/c	Rasio air terhadap semen
SSD	<i>Saturated Surface Dry</i>
SIPSN	Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Perhitungan Kuat Tekan	64
Lampiran 2 Perhitungan <i>Mix Design</i>	64
Lampiran 3 Perhitungan Emisi Tahapan Bahan Baku dalam Setiap Sampel ..	65
Lampiran 4 Total Tahapan Bahan Baku dan Persentase Penurunan Emisi	67
Lampiran 5 Dokumentasi Persiapan Material	67
Lampiran 6 Dokumentasi Pembuatan Benda Uji	68
Lampiran 7 Dokumentasi Perawatan Curing Benda Uji	68
Lampiran 8 Dokumentasi Pengujian Benda Uji.....	69

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“SINERGITAS LIMBAH BUBUK GELAS LAMPU NEON DAN *FLY ASH* SEBAGAI PENGGANTI SEMEN DALAM CAMPURAN MORTAR RAMAH LINGKUNGAN”** yang merupakan salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa banyak kendala yang dihadapi dalam penyusunan Tugas Akhir ini, akan tetapi karena bantuan dari berbagai pihak maka Tugas Akhir ini dapat terselesaikan. Oleh karena itu, dengan segala rasa hormat dan ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T., IPM., ASEAN .Eng. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin atas semua dukungan dan kebijakannya sehingga penulis dapat mengikuti perkuliahan dengan baik.
2. Ibu Dr. Eng. Muralia Hustim, S.T., M.T., IPM. selaku Ketua Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin atas segala bimbingan dan nasehat yang diberikan selama perkuliahan.
3. Bapak Dr. Eng. Irwan Ridwan Rahim, S.T., M.T., selaku Kepala Laboratorium Riset Sanitasi dan Persampahan sekaligus Dosen Pembimbing Utama yang telah meluangkan waktu, kesempatan, dan tenaganya untuk membimbing penulis dalam penulisan tugas akhir hingga selesai.
4. Bapak Dr. Eng. M. Akbar Caronge, S.T., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang selalu sabar dan memberi arahan dalam proses penelitian hingga proses bimbingan tugas akhir.
5. Seluruh Dosen Departemen Teknik Lingkungan Universitas Hasanuddin yang telah membimbing penulis sejak awal perkuliahan hingga penulis lulus.
6. Ibu Sumi, Pak Olan, dan Kak Tami selaku staff Departemen Teknik Lingkungan yang selalu membantu semua proses administrasi dengan lancar.

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua saya yang tercinta, yaitu abah Suhanadi Utu Arimin dan ibu Nurhayati karena atas doa, kasih sayang dan dukungan selama ini baik material maupun spiritual penulis bisa menyelesaikan perkuliahan ini.
2. Kedua saudara saya yaitu abang Anggi Riyaldi dan adik Ryu Rivaldi yang selalu mendengar keluh kesah penulis selama ini. Terima kasih sudah tetap kuat dalam menjalani kehidupan yang rumit dan mau berjuang bersama-sama dari 0 sampai sekarang.
3. Almarhum kakek Utu Arimin dan nenek Hasiah yang telah merawat saya dari kecil, selalu memberikan semangat dan mengajarkan arti ikhlas dan sabar dalam kehidupan yang sesungguhnya.
4. Tante tersayang Yuyun Susanti sebagai pengganti ibu dari penulis masih kecil, yang kasih sayangnya sangat besar. Selalu mengajarkan hal-hal yang baik, lebih memahami arti kehidupan, pantang menyerah, sehingga penulis menjadi pribadi yang tidak mudah menyerah sampai sekarang.
5. Diri sendiri, Dhea Aprilianti yang sudah berjuang sampai saat ini. Tanpa semangat dan dukungan dari diri sendiri, mungkin Dhea tidak akan sampai pada titik ini.
6. Sahabat TB yaitu Nisaf, Inu, Izah, Danti Oho, Cesa, Hana, Nuaz, dan Vivi yang senantiasa memberi masukan dan dukungan sampai masanya saat penulis di titik sangat terpuruk. Akan tetapi berkat bantuan kalian, penulis bisa menyelesaikan ini semua. Terima kasih banyak dan semoga kita bisa bertemu lagi serta tetap berkomunikasi baik antara satu sama lain.
7. Widiya dan keluarga yang merupakan teman penulis dari masih Mahasiswa Baru dan bersedia menampung penulis selama beberapa bulan, serta memberikan masukan saat pengerjaan tugas akhir.
8. Terima kasih kepada NIM D011191013 yang sudah sabar dan memberi warna dalam kehidupan penulis dari awal menjadi asisten hingga sekarang. Terima kasih sudah rela berkorban dan memahami hati penulis yang kadang memang sangat menyebalkan ini. Semoga selalu bahagia dimanapun berada dan cepat mendapatkan hidayah-Nya. Sampai jumpa di ucapan terima kasih ku pada tulisanku yang selanjutnya lagi. Aamiin.

9. Kak Nurkhalifa, kak Irham, kak Fadiq, kak Ummul, kak Pororo, kak Neti, kak Dinda, kak Ifa, kak Dilla, kak Wiwi yang sudah meluangkan waktu dan tenaganya untuk membantu dan mengarahkan penulis serta menjawab pertanyaan yang selalu penulis ajukan setiap hari. Terima kasih banyak kak.
10. Terima kasih Fidel Dampang selaku partner penulis dalam mengambil data dari awal sampai akhir. Sukses terus ya kawan.
11. Sahabat selama perkuliahan, Muhammad Rishawan yang selalu siap direpotkan setiap waktu, terima kasih atas arahan dan bantuannya yang selalu membantu penulis dari Semester 4 sampai sekarang. Muhammad Fadil Rasyid Ridha yang siap direpotkan juga dan mengarahkan penulis untuk revisi desain serta siap membantu penulis dalam pengerjaan apapun.
12. Nurnisa partner KP-ku, terima kasih Nisa atas kerja samanya sudah kebersamai sewaktu KP dan kompak dalam pengerjaan laporan dan lainnya.
13. Pak Roy selaku Pembimbing KP, Mba Nia, Pak Albert yang sudah membantu dan mengajari penulis berproses saat KP di Bantargebang.
14. Teman-teman Sanitasi 2019 yang isinya manusia ambisius, bersaing secara sehat tapi kadang suka minder satu sama lain padahal semua karyanya bagus semua.
15. Seluruh rekan-rekan di Laboratorium Hidrolika yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
16. Seluruh asisten Laboratorium Struktur dan Bahan serta teman-teman Lab Riset Eco Material yang sudah membantu dan mengajari pada saat pengujian dan penelitian berlangsung.
17. Teman-teman dalam kepengurusan kabinet Rekonstruksi Himpunan Mahasiswa Teknik Lingkungan yang telah meluangkan dan membantu penulis dalam proses penulisan tugas akhir.
18. Teman-teman KKN Desa Wisata Maros Gelombang 109, Yuni, Yuli, Cia, Aii, Pandu, Ferdy, Sahrul yang sudah membantu selama KKN, banyak suka dan duka yang didapatkan. Maaf jika ada perkataan dan perbuatan penulis yang misalnya kurang berkenan di hati teman-teman. Lancar-lancar urusannya sobad KKN-ku.

19. Teman-teman Teknik Lingkungan 2019 yang selalu memberikan semangat, dukungan, cerita, hingga suka maupun duka selama berproses di Teknik.
20. Saudara Portland 2020 yang senantiasa memberikan dukungan selama pengerjaan Tugas Akhir.
21. Serta segala pihak yang ikut serta terlibat dalam penelitian hingga pembuatan laporan Tugas Akhir yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam pembuatan Tugas Akhir ini. Untuk itu, saran dan kritik yang bersifat membangun sangat dibutuhkan oleh penulis untuk perbaikan ke depannya. Terima Kasih.

“Janganlah kamu bersedih, sesungguhnya Allah bersama kita” (QS. At-Taubah:40)

Gowa, 14 Juli 2023

(Dhea Aprilianti)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia pada waktu ini berada dalam perubahan-perubahan yang besar, baik sosial, politik, ekonomi dan budaya. Sektor konstruksi dan bangunan di Indonesia pun saat ini mengalami lonjakan nilai yang terus naik dan menunjukkan kinerja yang luar biasa dilihat dari berkembangnya pembangunan yang telah berjalan dan selalu meningkat setiap tahunnya. Kondisi ini dipengaruhi karena meningkatnya permintaan akan pembangunan dan pertumbuhan pada sektor properti di Indonesia. Dalam beberapa tahun terakhir, bahan limbah daur ulang telah banyak digunakan untuk menghasilkan bahan konstruksi dalam upaya untuk mengurangi pemanfaatan sumber daya alam dan limbah pascakonsumen yang masuk ke tempat pembuangan sampah.

Dunia industri di Indonesia menjadi salah satu penyumbang terbesar pendapatan negara. Namun disisi lain limbah yang dihasilkan kemudian hari jika tidak dikelola dengan baik akan berdampak buruk bagi lingkungan yang salah satunya merupakan limbah kaca. Berdasarkan data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional periode 2017-2018 jumlah persentase limbah kaca yaitu 4,12% dari total limbah keseluruhan 8 juta ton per hari (SIPSN, 2018). Penggunaan mortar pada bidang konstruksi merupakan komponen utama dalam struktur bangunan yang saat ini banyak digunakan di Indonesia. Bahan pembuatan mortar terdiri dari agregat halus, air dan semen sebagai pengikatnya. Agregat halus biasanya menempati sekitar 60%-80% dari volume total mortar, maka sifat agregat memiliki pengaruh yang besar terhadap perilaku mortar yang sudah mengeras.

Produksi semen melepaskan 0.9 ton gas karbon dioksida (CO₂) ke atmosfer, yang menyebabkan efek rumah kaca dan pemanasan global. Kerusakan terhadap lingkungan dapat terjadi disebabkan emisi karbon dioksida yang berasal dari pembakaran batu bara dalam pembuatan semen *portland*. Salah satu alternatif solusi untuk menggantikan semen *portland* yaitu menggunakan hasil pembakaran batu bara atau *fly ash* guna meningkatkan kualitas mortar dan mengurangi efek buruk terhadap lingkungan. Penggunaan *fly ash* dalam semen meningkatkan kekuatan

daya tahan, meningkatkan ketahanan sulfat, mengurangi panas hidrasi, risiko reaksi alkali silika dan pengkristalan. Pada penelitian ini penggunaan *fly ash* digunakan dengan maksud mengurangi dampak buruk terhadap lingkungan dengan pemanfaatan kembali residu pembakaran batu bara. Sifat kimia yang berguna sebagai pengikat dalam pembuatan beton atau sifat pozzolan yang sama dengan semen. Oleh sebab itu *fly ash* dapat berfungsi sebagai pengganti semen dalam meningkatkan kualitas mortar sendiri. (Budi, dkk 2021)

Kaca adalah bahan *non-biodegradable* yang diproduksi dalam berbagai bentuk dan warna. Sebagai bahan limbah, hal ini menimbulkan gangguan besar bagi pengelolaan sampah terutama mengenai operasi TPA. Bahan kaca, karena sifatnya menempati sebagian besar ruang TPA, sering mengakibatkan pencemaran lingkungan yang serius. Oleh karena itu, dengan meningkatnya kelangkaan ruang untuk tempat pembuangan dan kebutuhan untuk mengurangi limbah, solusi alternatif untuk pembuangan limbah kaca di TPA diperlukan dan salah satu solusi terbaik untuk mengatasi gangguan lingkungan sehingga limbah kaca ini bisa digunakan kembali. Penggunaan kembali limbah kaca dalam mortar menawarkan solusi lingkungan yang menjanjikan untuk masalah yang berkembang dari limbah kaca yang dihasilkan di negara berkembang.

Berdasarkan data Menteri Lingkungan dan Kehutanan tahun 2020, jumlah limbah kaca di Indonesia mencapai 0.7 juta ton pertahun. Lampu neon mengandung unsur kimia seperti merkuri dan debu fosfor untuk menghasilkan cahaya. Bagian dari merkuri yang terkandung dalam pelepasan dan lampu neon menghasilkan cahaya tampak, sementara bagian lain berinteraksi dengan kaca dan bubuk fosfor. Di pabrik pengolahan lampu, di mana limbah kaca dipisahkan dan diambil kembali, debu di dalam lampu dikumpulkan dengan cara ditiup untuk menggunakan kembali merkuri pada lampu baru. Oleh karena itu, kaca yang dikumpulkan dan mengandung merkuri yang terdifusi ke dalam kaca maupun yang berasal dari residu debu tidak dapat dihilangkan seluruhnya. (Rey-Raap dan Gallardo, 2021)

Penggunaan material *fly ash* sebagai material pembentuk mortar didasari pada sifat material ini yang memiliki kemiripan dengan sifat semen. Kemiripan sifat ini dapat ditinjau dari dua sifat utama, yaitu sifat fisik dan kimiawi. Secara fisik, material *fly ash* memiliki kemiripan dengan semen dalam hal kehalusan butir-

butirnya. *Fly ash* memiliki sifat dasar hampir sama seperti semen dalam kehalusan butirannya. Penggunaan *fly ash* sebagai material pembentuk mortar memberikan dampak positif jika ditinjau dari segi lingkungan seperti sebagai penimbun lahan bekas pertambangan, bahan baku keramik, sebagai adsorben dan konversi menjadi zeolit. (Faradilla, 2016)

Pengurangan dan daur ulang limbah adalah elemen kunci dalam kerangka pengelolaan limbah untuk mencapai pembangunan berkelanjutan, karena membantu melestarikan sumber daya alam, mengurangi konsumsi energi, mengurangi kebutuhan bahan baku untuk menghasilkan produk baru mengurangi polusi udara, air dan tanah, mengurangi permintaan ruang TPA dan juga menciptakan lapangan kerja. Oleh karena itu, solusi inovatif baru adalah dengan memanfaatkan limbah padat atau hasil samping industri seperti *fly ash* dan limbah kaca sebagai bahan alternatif penyusun mortar. Inovasi ini membantu mengurangi dampak negatif dari industri konstruksi terhadap lingkungan dan pada saat yang sama memiliki biaya rendah dan mortar yang sangat tahan lama dan ramah lingkungan.

Dalam penelitian ini dilakukan upaya untuk memasukkan dan membandingkan limbah kaca dalam berbagai proporsi sehingga sifat produk akhir campuran mortar dengan campuran kontrol. Penelitian saat ini bertujuan untuk mengetahui perbandingan kuat tekan dan variasi penambahan limbah gelas lampu sebagai bahan tambah semen pada pembuatan mortar serta menganalisis mortar yang mengandung bubuk kaca dari limbah kaca yang bersumber dari tempat pembuangan limbah sebagai pengganti sebagian semen dalam produksi mortar. Sehingga, berdasarkan latar belakang diatas maka dilakukanlah penelitian dengan judul:

**“SINERGITAS LIMBAH BUBUK GELAS LAMPU NEON DAN *FLY ASH*
SEBAGAI PENGGANTI SEMEN DALAM CAMPURAN MORTAR
RAMAH LINGKUNGAN”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang terkait, maka dapat dirumuskan beberapa masalah yaitu:

1. Bagaimana proses dan karakteristik limbah gelas lampu dalam penggunaannya menjadi bahan pembuatan mortar?
2. Bagaimana pengaruh perbandingan beberapa variasi campuran limbah gelas lampu dan *fly ash* sebagai pengganti semen terhadap ketahanan mortar?
3. Bagaimana pengaruh pH limbah gelas lampu dan *fly ash* apabila di lepaskan ke lingkungan?
4. Apa perbedaan antara mortar biasa dan mortar ramah lingkungan terhadap polusi karbon?

1.3 Tujuan Penelitian/Perancangan

Berdasarkan rumusan masalah yang terkait, maka dapat dirumuskan tujuan penelitian yaitu:

1. Mengetahui proses penggunaan limbah gelas lampu menjadi bahan substitusi pencampuran semen ramah lingkungan serta karakteristiknya.
2. Mengetahui pengaruh dan perbandingan kuat tekan antara limbah gelas lampu dan *fly ash* dengan mortar biasa.
3. Mengetahui pH penggunaan mortar ramah lingkungan yang maksimal apabila dilepaskan ke lingkungan.
4. Untuk menganalisis perbedaan antara mortar biasa dan mortar ramah lingkungan terhadap polusi karbon serta reduksi dari penggunaan semen.

1.4 Manfaat Penelitian/Perancangan

Adapun manfaat penelitian yang diharapkan adalah sebagai berikut:

1. Bagi Penulis

Dapat menambah pengetahuan terkait pengolahan limbah yang diteliti serta mendapatkan gelar ST (Sarjana Teknik) di Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

2. Bagi Pemerintah

Pada penelitian ini bisa menjadi dasar pengembangan dalam bidang konstruksi yang ramah lingkungan, sehingga bisa dijadikan solusi dalam mengatasi permasalahan karbon, emisi gas dan pencemaran yang biasa terjadi di lingkungan.

3. Bagi Masyarakat

Dapat menjadi solusi dan mengefesiensikan penggunaan bahan konstruksi dalam mengatasi masalah pencemaran sehingga lingkungan menjadi lebih baik.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Dalam penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan berfokus pada substitusi limbah lampu dan abu terbang dengan variasi 0%, 5% GP, 10% GP, 15% GP, 20% GP, 5% FA dan 5% GP, 7.5% FA dan 7.5% GP, serta 10% FA dan 10% GP. Abu terbang yang digunakan berasal dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap yang berlokasi di Kabupaten Barru. Selain itu, untuk mendapatkan persentase penurunan emisi dari bahan baku yang digunakan. Oleh sebab itu, ruang lingkup yang penulis berikan yaitu sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi pembuatan mortar dengan memanfaatkan gelas lampu dan *fly ash* sebagai substitusi campuran semen.
2. Membandingkan keefektifan dan pH penggunaan mortar normal dengan campuran gelas lampu dan *fly ash*.
3. Menganalisis perbandingan nilai emisi CO₂ yang dihasilkan dari mortar dalam penggunaan bahan baku agar bisa mengetahui reduksi dari penggunaan material.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Limbah Lampu

1. Jumlah Limbah Lampu

Berdasarkan nilai tahunan global sekitar 180 juta ton limbah lampu dihasilkan dengan tingkat daur ulang tidak lebih dari 20%. Masalah penting yang didapat yaitu pencemaran lingkungan meningkat. Oleh karena itu, diperlukan daur ulang untuk mereduksi tingkat limbah yang dibuang ke lingkungan agar bisa melindungi ekosistem serta menghemat biaya. Kaca adalah limbah yang tidak diinginkan yang membutuhkan lebih sedikit panas untuk diproses sebagai pozzolan untuk digunakan dalam mortar dan mengurangi emisi gas rumah kaca karena berkurangnya penggunaan semen yang dibutuhkan per unit mortar akibat penggantian. (Geduk, 2021)

Limbah lampu seringkali lebih murah dan mengganti sebagian semen sehingga mengurangi konsumsi semen *portland* dan mengkonsumsi kelebihan kalsium hidroksida dalam komposisi semen yang dapat beraksi dengan bahan kimia di lingkungan untuk melemahkan mortar yang dipadatkan. Ini akan membantu mengatasi masalah limbah kaca dalam pengelolaan limbah dan dapat mengarah pada peningkatan daya tahan, pencegahan kerusakan dan peningkatan kekuatan mortar jangka panjang, penghematan energi, promosi keseimbangan ekologi dan konservasi sumber daya alam. (Joshua Opeyemi, 2018)

Berikut negara dengan limbah lampu yang dihasilkan pertahun dapat di lihat pada **Tabel 1**:

Tabel 1. Jumlah Limbah Lampu di Berbagai Negara

Negara	Jumlah Limbah	Jumlah Penduduk	Jumlah Limbah Lampu		Tahun	Sumber
			(ton/kapita/thn)	(ton/kapita/thn)		
Amerika	10,37 juta ton	316,1 juta	0,0328	32,806	2013	<i>Environmental Protection Agency, 2020</i>
Eropa	1,5 juta ton	742,4 juta	0,002	2,0205	2013	<i>Environmental Protection Agency, 2020</i>
Nigeria	2,08 juta ton	198,4 juta	0,0105	10,5242	2018	<i>Science and Engineering, 2019</i>
Indonesia	0,7 juta ton	270,2 juta	0,0026	2,5907	2020	KLHK, 2020

2. Penggunaan atau Pemanfaatan Limbah Lampu dalam Dunia Konstruksi

Situasi pembuangan limbah lampu ke tempat pembuangan akhir tidak memberikan solusi pengelolaan limbah kaca, dikarenakan bentuk limbah lampu tidak dapat terurai secara hayati. Komposisi kimia dan sifat pozzolan dari limbah lampu mendorong bahwa pemanfaatan limbah dalam industri semen dan beton memberikan solusi yang ramah lingkungan. Masalah lainnya yaitu memanfaatkan atau mendaur ulang bahan-bahan dalam mortar sebagai pozzolan, yang berarti bahan tersebut dapat digunakan untuk menggantikan semen pada tingkat yang berbeda-beda. Adapun pemanfaatan ini sebagai alternatif yang akan berfungsi untuk memfasilitasi pengelolaan limbah padat yang efektif.

Penggunaan limbah lampu dalam pengikat semakin penting karena berhubungan dengan ukuran yaitu dibawah 50 mm. Karakteristik pozzolan dari limbah GP bertanggung jawab dalam mengurangi efek dari reaksi alkali-silika dan bereaksi dengan alkali dalam semen sehingga nantinya membantu pengembangan kekuatan. Limbah lampu yang sudah berupa *glass powder* dengan kehalusan <75 mm akan menginduksi reaksi pozzolan dan menghilangkan reaksi alkali-silika.

Pemanfaatan limbah lampu sebagai daur ulang tambahan dapat digunakan dalam tambahan campuran beton aspal yang nantinya akan menghasilkan pengurangan signifikan untuk mengurangi pembuangan TPA dan emisi rumah kaca. Limbah kaca sebagai pengisi mineral dalam campuran untuk membangun perkerasan aspal hijau sebagai metode untuk membantu dalam pelestarian bahan langka yang terjadi secara alami.

3. Identifikasi Limbah Lampu dalam Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3)

Bahan Berbahaya dan Beracun adalah zat, energi, dan/atau komponen lain yang karena sifat, konsentrasi, dan/atau jumlahnya, baik secara langsung maupun tidak langsung, dapat mencemarkan dan/atau merusak lingkungan hidup, dan/atau membahayakan lingkungan hidup, kesehatan, serta kelangsungan hidup manusia dan makhluk hidup lain. (Permen LHK No. 12 Tahun 2020). Berdasarkan PP No. 22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup bahwa setiap orang yang menghasilkan Limbah B3 wajib

melakukan Pengelolaan Limbah B3 yang dihasilkannya. Limbah B3 berdasarkan sumbernya dibagi menjadi 3 kategori yaitu:

a. Limbah B3 dari Sumber Tidak Spesifik

Limbah ini tidak berasal dari proses utama, melainkan dari kegiatan pemeliharaan alat, inhibitor korosi, pelarutan kerak, pencucian, pengemasan dan lain lain.

b. Limbah B3 dari Sumber Spesifik

Limbah ini berasal dari proses kegiatan industri (kegiatan utama).

c. Limbah B3 dari Sumber Lain

Limbah ini berasal dari proses kegiatan ini berasal dari sumber yang tidak diduga, misalnya produk kedaluwarsa, sisa kemasan, tumpahan, dan buangan produk yang tidak memenuhi spesifikasi.

Bahan-bahan yang terkandung di dalam limbah B3 memiliki karakteristik yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan bagi makhluk hidup dan dapat mencemari lingkungan. Menurut PP No. 22 Tahun 2021, karakteristik limbah B3 ada 6 (enam) kriteria yaitu mudah meledak, mudah terbakar, bersifat reaktif, beracun, menyebabkan infeksi, dan bersifat korosif.



Gambar 1. Simbol Limbah B3 Beracun

Sumber: PerMen LH No. 14 Tahun 2013

Limbah lampu neon mampu menghasilkan cahaya yang terang dengan penggunaan energi cukup hemat dengan harga terjangkau. Adapun yang membuat limbah lampu neon masuk dalam kategori B3 yaitu, didalam tabung lampu neon

terdapat kandungan gas salah satunya merkuri. Apabila gas ini tidak ditangani maka akan dapat mencemari lingkungan yaitu udara, tanah, air dan berdampak pada kesehatan manusia seperti gangguan syaraf, ginjal, penglihatan, pendengaran serta kelumpuhan hingga kematian. Hal inilah yang menyebabkan lampu neon dikategorikan sebagai limbah B3 atau limbah bahan berbahaya dan beracun.

Salah satu limbah B3 dari sumber tidak spesifik dari rumah tinggal yaitu limbah elektronik termasuk *cathode ray tube* (CRT), lampu TL, *printed circuit board* (PCB), karet kawat (*wire rubber*). Pada lampiran IX, limbah lampu neon termasuk dalam bentuk limbah padat dari sumber tidak spesifik yang mempunyai karakteristik beracun dengan kode limbah B107 kategori bahaya 2. Limbah B3 dengan kategori 2 memiliki efek tunda dan berdampak tidak langsung.

4. Karakteristik dari Limbah Lampu

Pada umumnya, sifat-sifat dari lampu dipengaruhi oleh silika (SiO_2) saat proses pembentukannya. Menurut Prasetyo (2020), adapun karakteristik dari serbuk limbah lampu dalam proses pembuatan mortar yaitu:

- a. Limbah lampu yang berupa kaca yaitu bahan yang tidak menyerap udara atau tidak menyerap air.
- b. Sifat kaca yang tidak menyerap udara dapat mengisi rongga-rongga secara maksimal sehingga mortar bersifat kedap udara.
- c. Serbuk kaca memiliki kandungan kimia yang mirip dengan semen yaitu silika (SiO_2), aluminium oksida (Al_2O_3), besi oksida (Fe_2O_3) dan kapur (CaO). Adapun unsur yang paling banyak yaitu silika (SiO_2), sehingga serbuk kaca termasuk dalam bahan pozzolan yaitu bahan yang mengandung silika dan bersifat mengikat.
- d. Serbuk kaca dapat digunakan sebagai bahan pengisi pori, sehingga akan diperoleh mortar yang lebih padat dan meningkatkan kekuatan dari mortar itu sendiri.

Tabel 2. Kandungan yang ada dalam Kaca

Komposisi	% Kandungan
SiO_2	61,72%
Al_2O_3	3,45%
Fe_2O_3	0,18%
CaO	2,59%

Sumber: Prasetyo, 2020

5. Dampak Lingkungan dan Ekonomi dari Limbah Lampu

Di banyak negara, jaminan kualitas teknis dan lingkungan memastikan bahwa bahan daur ulang memiliki kualitas yang sama dengan sumber daya murni dan memanfaatkan penggunaan bahan limbah padat. Bahan bangunan dipilih berdasarkan fungsi dan segi ekonomisnya. Penilaian siklus hidup (LCA) dan analisis biaya siklus hidup (LCCA) sering digunakan untuk menganalisis kinerja lingkungan dan ekonomi.

a. Lingkungan

Substitusi produk limbah kaca sebagai pengisi atau pengganti agregat konvensional akan berpengaruh terhadap lingkungan. Beban lingkungan yang terkait dengan pembuatan campuran mortar atau bahan konstruksi yang diukur dengan Potensi Pemanasan Global (GWP) berkurang seiring dengan peningkatan kandungan Pengikat Perkerasan Reklamasi (RAP). Hal tersebut disebabkan karena faktor emisi RAP 20% lebih rendah dari bahan konvensional, oleh karena itu dimasukkannya RAP untuk mengurangi penggunaan energi dan emisi. (Lima et al., 2020)

b. Ekonomi

Sebelum diaplikasikan, limbah memerlukan perlakuan awal yang tepat untuk menjamin bahwa eksploitasi bahan limbah padat yang digunakan aman tanpa membahayakan ekosistem dan kesehatan manusia. Campuran mortar dengan kinerja jangka pendek dan jangka panjang yang unggul dapat mengurangi biaya produksi dan pemeliharaan. Daur ulang ini dapat menghasilkan produk mortar yang lebih ramah lingkungan, berkelanjutan dengan menghemat biaya produksi, serta meningkatkan pengelolaan limbah. (Al-Bayati et al., 2018)

2.2 Abu Terbang (*Fly Ash*)

1. Histori Abu Terbang

Berdasarkan SNI 03-6414-2002 abu terbang (*fly ash*) merupakan limbah hasil dari pembakaran batu bara pada tungku pembangkit listrik tenaga uap yang berbentuk halus, bundar, dan bersifat pozzolonik. Oleh karena abu terbang bersifat pozzolan, maka abu terbang dapat bereaksi dengan kapur pada suhu 24°C-27°C dengan media air sehingga membentuk senyawa yang bersifat

mengikat.

Fly ash atau abu terbang merupakan residu pembakaran batu bara yang diperoleh dengan mengendapkan secara elektrostatis atau mekanis debu partikel hasil pembakaran batu bara dari gas buang pada tungku pembakaran. Abu terbang terdiri atas 2 macam yaitu yang pertama mengandung silika (*siliceous*) memiliki karakteristik pozzolan. Jenis abu terbang yang kedua yaitu berkapur dalam bentuk alami (*calcareous*) memiliki karakteristik pozzolan, di samping itu memiliki sifat hidrolis.

Fly ash adalah sisa-sisa pembakaran batu bara yang berbentuk partikel halus dan merupakan bahan anorganik yang terbentuk dari perubahan bahan mineral karena proses pembakaran dari proses pembakaran batubara. Apabila *fly ash* tidak diolah, maka akan menyebabkan pencemaran udara, air, dan tanah. Umumnya *fly ash* akan dimanfaatkan dalam industri konstruksi untuk menyempurnakan material konstruksi yang ada karena sifat pozzolannya. Sifat kimia *fly ash* memiliki kandungan silika (SiO_2) yang tinggi, sifat inilah yang menjadikan *fly ash* digunakan sebagai bahan pengganti semen, sehingga pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan pengganti semen dapat mengurangi produksi semen. (Prasetyo, 2019)

Menurut Billah, dkk (2019) dalam Satra (2023), identifikasi *fly ash* yaitu memiliki potensial berupa sumber unsur hara makro dan mikro tanaman yang berfungsi untuk memperbaiki sifat fisik dan kimia tanah. *Fly ash* mempunyai sifat hidrophilik pengikat apabila dicampur dengan air dan bisa mengikat pasir untuk menarik dan mengikat air pada permukaannya. Sehingga, apabila *fly ash* dicampur dengan air dan pasir maka akan terjadi ikatan yang mengakibatkan berkurangnya celah atau pori-pori diantara butiran pasir. *Fly ash* memiliki tiga karakteristik, yang pertama yaitu dari segi gradasi jumlah presentase yang lolos saringan No. 200 (0,075 mm) berkisar antara 60% sampai 90%, kedua warna *fly ash* dari abu-abu sampai hitam (semakin terang warnanya, maka semakin rendah kandungan karbonnya), dan *fly ash* bersifat tahan air (*hydrophobic*).

Pemanfaatan abu terbang batubara sedang dilakukan untuk meningkatkan nilai ekonomisnya serta mengurangi dampak buruknya terhadap lingkungan. Saat ini umumnya abu terbang batubara digunakan dalam pabrik semen sebagai

salah satu bahan campuran pembuat beton. Selain itu *fly ash* memiliki beberapa kegunaan yaitu sebagai penimbun lahan bekas pertambangan, bahan baku keramik, sebagai adsorben dan konversi menjadi zeolit. Menurut Sunardi (2006) dalam Faradilla (2016), keuntungan adsorben berbahan baku *fly ash* adalah biayanya yang murah. Selain itu, adsorben ini dapat digunakan baik untuk pengolahan limbah gas maupun limbah cair. Adsorben ini dapat digunakan dalam penyisihan logam berat, limbah zat warna berbahaya, dan senyawa organik pada pengolahan limbah.

Adapun kendala yang dihadapi oleh perusahaan yang menggunakan batubara dalam mengelola limbah hasil pembakaran batubara (LHPB) adalah terbatasnya lahan untuk penyimpanan sementara LHPB, sedangkan LHPB setiap hari terus bertambah dan yang memanfaatkan LHPB sangat terbatas. Oleh sebab itu, limbah abu terbang harus dimanfaatkan kembali sebagai bentuk daur ulang, karena apabila limbah tersebut tidak dimanfaatkan secara maksimal maka akan menimbulkan dampak sosial dan lingkungan.

2. Proses Pembentukan Abu Terbang (*Fly Ash*)

Pada sistem pembakaran batubara, terbagi menjadi dua sistem yaitu sistem unggun terfluidakan (*fluidized bed system*) dan unggun tetap (*fixed bed system* atau *grate system*). *Fluidized bed system* adalah sistem dimana udara ditiup dari bawah sehingga benda padat di atasnya berkelakuan mirip fluida. Teknik fluidisasi dalam pembakaran batubara adalah teknik yang paling efisien dalam menghasilkan energi. Pasir berfungsi sebagai medium pemanas yang dipanaskan terlebih dahulu. Setelah temperatur pasir mencapai temperatur bakar batubara (300°C) maka diumpankanlah batubara. Sistem ini menghasilkan abu terbang dan abu yang turun di bawah alat. Sedangkan *fixed bed system* atau *grate system* adalah teknik pembakaran dimana batubara berada di atas conveyor yang berjala. Sistem ini kurang efisien karena batubara yang terbakar kurang sempurna atau dengan perkataan lain masih ada karbon yang tersisa.

Fly ash batubara memiliki kemampuan dapat menyerap air dan beberapa unsur hara sehingga dapat meningkatkan kualitas adsorpsi dengan baik. Selain itu *fly ash* batubara juga dapat digunakan sebagai adsorben berbagai macam zat

zat polutan seperti SO_x , CO, dan partikulat debu termasuk timbal (Pb). *Fly ash* juga digunakan dalam bahan cetakan pada industri pengecoran logam karena memiliki ukuran butir jauh lebih kecil daripada pasir cetak sehingga saat dibuat cetakan akan menghasilkan permukaan yang lebih halus.

3. Jenis-jenis Abu Terbang

Berikut merupakan jenis dari abu terbang (*fly ash*):

a. Abu Terbang (*Fly Ash*) Jenis *Siliceous*

Abu terbang jenis *siliceous* adalah serbuk halus dari partikel berbentuk bola yang sebagian besar memiliki sifat pozzolanik. Pada dasarnya terdiri dari silikon dioksida (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3) yang reaktif. Sisanya mengandung besi oksida (FeO_3) dan senyawa lainnya. Kandungan kalsium oksida reaktif (CaO) harus kurang dari 10,0% massa, kandungan kalsium oksida bebas, tidak melebihi 1,0% massa. Abu terbang yang memiliki kandungan kalsium oksida bebas lebih tinggi dari 1,0% massa tetapi kurang dari 2,5% massa juga dapat diterima, asalkan persyaratan pada ekspansi (soundness) tidak melebihi 10 mm saat diuji menggunakan campuran 30% massa dari abu jenis *siliceous* dan 70% massa dari semen CEM sesuai dengan EN 197-1.

b. Abu Terbang Berkapur (*Calcareous Fly Ash*)

Abu terbang berkapur adalah kapur bubuk halus, yang memiliki sifat hidrolis dan/atau pozzolanik. Pada dasarnya terdiri dari oksida kalsium reaktif (CaO), reaktif silikon dioksida (SiO_2) dan aluminium oksida (Al_2O_3). Sisanya mengandung besi oksida (FeO_3) dan senyawa lainnya. Proporsi kalsium oksida reaktif tidak kurang dari 10,0%, massa abu terbang berkapur mengandung kalsium oksida reaktif antara 10,0% hingga 15,0% dari jumlah dan harus memuat silikon dioksida reaktif tidak kurang dari 25,0% dari jumlah massa. Abu terbang berkapur yang telah dihaluskan mengandung kalsium oksida reaktif lebih dari 15,0% dari jumlah massa, harus mempunyai kuat tekan minimal 10,0 MPa pada umur 28 hari bila diuji sesuai dengan EN 196-1. Sebelum pengujian, abu terbang harus dihaluskan dan kehalusannya pada ayakan basah dengan saringan 40 μm harus antara 10% dan 30% dari jumlah massa.

4. Tipe-tipe Abu Terbang (*Fly Ash*)

Berdasarkan ASTM C618-12a, klasifikasi abu terbang (*fly ash*) terbagi menjadi 3 kelas, dengan perbedaan utama yaitu banyaknya kalsium, silika, aluminium dan kadar besi ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) yaitu:

a. *Fly Ash* Kelas N

Fly ash kelas N mempunyai sifat *pozzolan* yang baik dan berasal dari *pozzolan* alam atau hasil pembakaran yang dapat digolongkan antara lain tanah *diatomic*, *opaline chert*, *shales*, *tuff*, dan abu vulkanik yang biasa diproses melalui pembakaran atau tidak melalui proses pembakaran.

b. *Fly Ash* Kelas F

Fly ash kelas F disebut juga dengan *low-calcium fly ash*, yang tidak mempunyai sifat *cementitious* dan hanya bersifat *pozzolan*. *Fly ash* kelas F mengandung CaO yang lebih kecil dari 10% yang dihasilkan dari pembakaran *anthracite* atau bitumen batu bara (*bituminous*).

c. *Fly Ash* Kelas C

Fly ash kelas C disebut juga dengan *high-calcium fly ash*. Karena kandungan CaO yang cukup tinggi, jika terkena air atau kelembaban maka akan berhidrasi dan mengeras dalam waktu sekitar 45 menit. *Fly ash* tipe C mempunyai sifat *pozzolan* dan *cementitious* (bersifat seperti semen).

5. Jumlah Abu Terbang (*Fly Ash*) dan Masalah Terhadap Lingkungan

Fly ash dapat didefinisikan sebagai residu yang dilepaskan dari proses pembakaran batubara di pembangkit listrik. *Fly ash* adalah residu yang tidak terbakar yang terbawa dari zona pembakaran di boiler oleh gas buang dan kemudian dikumpulkan oleh pemisah mekanis atau elektrostatis. Menurut statistik, tingkat produksi *fly ash* jelas jauh melebihi konsumsi karena peningkatan jumlah energi yang dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga batubara dan tersedia secara luas di seluruh dunia seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Produksi *Fly Ash* di Berbagai Negara

Negara	Jumlah Produksi (juta ton/tahun)	Negara	Jumlah Produksi (juta ton/tahun)
India	112	Malaysia	6.8
Cina	100	Kanada	6
Amerika Serikat	75	Perancis	3
Jerman	40	Denmark	2
Inggris	15	Italia	2
Australia	10	Belanda	2

Sumber: Ghazali, 2019

Fly ash mengandung silika, alumina, *ferric oxide* dan bahan oksida lainnya yang dapat mengubah *fly ash* menjadi bahan berbahaya. Bahan berbahaya ini merupakan faktor penyumbang pencemaran udara, air dan tanah yang menyebabkan masalah kesehatan manusia dan berbagai masalah geolingkungan. Situasi buruk ini akan mengganggu seluruh siklus ekologi jika tidak dibuang dengan benar. Oleh karena itu, diperlukan pengelolaan sampah yang baik untuk mempertahankan lingkungan yang sehat. Partikel *fly ash* akan berperilaku seperti racun kumulatif setelah menetap dalam waktu lama ketika mencapai daerah pernapasan. Akibatnya, beberapa gangguan fisiologis dan masalah kesehatan lainnya seperti gangguan pernapasan, kanker, anemia, gangguan hati, gastroenteritis dan dermatitis.

Pembuangan limbah secara basah menyebabkan migrasi logam ke dalam tanah. Populasi yang berada di sekitar lokasi pembuangan *fly ash* menghadapi pencemaran air permukaan dan pencemaran air bawah tanah. Namun, pencemaran air permukaan lebih kritis daripada pencemaran air bawah tanah. Pencemaran air permukaan menurunkan populasi ikan dan organisme akuatik lainnya karena bahan logam berat dan kandungan bahan organik yang terkandung di dalam air. Pencemaran air permukaan juga menyebabkan penyakit kulit, diare dan kematian akibat mandi dan minum air dari sungai yang tercemar.

6. Sifat dan Karakteristik Abu Terbang (*Fly Ash*) sebagai Bahan Konstruksi

Abu terbang (*fly ash*) dapat digunakan sebagai bahan campuran semen dengan tujuan untuk memperbaiki sifat-sifat mortar. Fungsi abu terbang (*fly ash*) sebagai aditif dalam mortar bisa sebagai pengisi yang akan menambah hubungan antara unsur yang ada di dalamnya dan mengurangi porositas sehingga membuat mortar menjadi lebih kuat. Porositas disini yaitu fungsi dari

rasio air terhadap semen (w/c) dalam suatu campuran. Peningkatan kekuatan mortar akibat dari kombinasi antara hidrasi semen dan rekasi *pozzolan*. Hidrasi semen melibatkan unsur-unsur yaitu reaksi kalsium silikat anhidrat dan aluminat dengan air untuk membentuk fase yang terhidrasi. Hasil hidrasi akan menempati ruang lebih banyak dari partikel-partikel dan menghasilkan massa yang kaku, sehingga semen yang telah bercampur dengan air akan mengeluarkan panas (Setiawati, 2018).

Fly ash sebenarnya tidak memiliki kemampuan mengikat seperti semen, akan tetapi dengan tambahan air dan ukuran partikel yang halus maka akan bereaksi secara kimia yaitu oksida silika dengan kalsium hidroksida yang terbentuk dari proses hidrasi semen sehingga bisa menghasilkan zat dengan kemampuan yang mengikat (Luther, 2019). Sedangkan untuk abu dasar batubara (*bottom ash*) memiliki karakteristik butiran yang kasar seperti pasir, berwarna hitam ke abu-abuan dan mempunyai ukuran seperti agregat halus (Susilowati, 2021).

Berikut merupakan sifat fisik dan kimia dari *fly ash*:

Tabel 4. Sifat Fisik dan Kimia *Fly Ash*

Sifat Fisik	
Variabel Pemanding	Karakteristik
Kehalusan Butir	5-27% lolos saringan 45 μm
Berat Jenis	2,15 - 2,8 g/cm^3
Waktu Pengikatan Awal	423 menit
Suhu Pengikatan	270 $^{\circ}\text{C}$
Kadar Air	0.4 %
Sifat Kimia	
Komponen Pemanding	% Rata-rata untuk <i>Fly Ash</i>
Kapur (CaO)	1 sampai 12
Silika (SiO ₂)	20 sampai 60
Alumina (Al ₂ O ₃)	5 sampai 35
Besi (Fe ₂ O ₃)	10 sampai 40
Magnesia (MgO)	0 sampai 5
Sulfur (SO ₃)	0 sampai 4
Soda, Na ₂ O+K ₂ O	0 sampai 7

Sumber: Setiawati, 2018

Tabel 5. Sifat Fisik *Bottom Ash*

Sifat Fisik	
Variabel Pemanding	Karakteristik
Bentuk	Angular/bersiku
Warna	Hitam ke abu-abuan

Sifat Fisik	
Variabel Pemanding	Karakteristik
Ukuran (% lolos ayakan)	No. 4 (90-100%)
	No. 10 (40-60%)
	No. 40 ($\leq 10\%$)
	No. 200 ($\leq 10\%$)
Spesific Gravity	2,3-2,9
Penyerapan	0,3-1,1 %

Sumber : Indriani Santoso, dkk, 2003 dalam Triwidinata, 2017

7. Pemanfaatan Abu Terbang (*Fly Ash*)

Fly ash mengandung oksida logam berat yang akan mengalami dispersi secara alami dan mencemari lingkungan. Di Indonesia, sebagai bahan yang diproduksi dalam jumlah besar dari kegiatan pembangkit listrik tenaga batubara, *fly ash* dikategorikan sebagai salah satu limbah yang tidak berbahaya sesuai dengan PP No.22 Tahun 2021 tentang Penyelenggaraan Perlindungan dan Pengelolaan Lingkungan Hidup. Salah satu alternatif penanganan limbah *fly ash* adalah sebagai campuran bahan bangunan. Penggunaan *fly ash* pada bahan konstruksi dapat menjadi solusi mengurangi jumlah timbulan *fly ash*. Dengan demikian, pemanfaatan limbah seperti *fly ash* sangat berpengaruh terhadap lingkungan (Bajpai et al., 2020). Karena kriteria kehalusan *fly ash* yang mendekati kehalusan semen, komposisi kimianya, dan sifat pozzolannya.

Fly ash cocok digunakan sebagai bahan baku di berbagai industri dan konstruksi karena bahan yang kaya oksida. Saat ini, *fly ash* berhasil digunakan dalam perbaikan bahan konstruksi dan sangat baik digunakan di sektor pertanian untuk meningkatkan sifat tanah. *Fly ash* juga dapat dimanfaatkan dalam pembuatan batu bara, pembuatan keramik, konstruksi jalan, produksi mortar dan kegiatan lainnya (Ghazali, 2019).

Pemanfaatan *fly ash* dalam industri konstruksi merupakan teknologi yang berkembang dalam meningkatkan kualitas konstruksi dan kualitas lingkungan. Penambahan *fly ash* pada mortar memberikan manfaat dari segi ekonomis, ekologis dan teknis. Saat ini, *fly ash* digunakan oleh industri semen sebagai bahan pozzolan untuk pembuatan semen *portland* pozzolan karena kandungan SiO_2 dan Al_2SiO_3 sangat mirip dengan semen *portland*. Dengan adanya kelembaban dan pada suhu kamar, ia bereaksi secara kimia dengan kalsium hidroksida untuk memperoleh senyawa yang memiliki sifat semen. Secara

teknis, penggunaan *fly ash* bersama dengan semen *portland* berkontribusi terhadap konsumsi Ca(OH)_2 yang terbentuk selama hidrasi semen dan mengarah pada pembentukan produk semen. *Fly ash* dapat digunakan sebagai pengganti sebagian semen berdasarkan berat semen atau sebagai bahan tambahan pada campuran mortar.

Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan campuran semen dapat menghemat energi dan biaya yang cukup besar dalam pembuatan semen. Penggantian semen menggunakan *fly ash* bisa mencapai 75% dari berat semen, namun ada standar ketat yang mengatur penggunaannya seperti *American Society for Testing Materials ASTM C 618* dan *European Standard EN 450-1*. Alternatif semen baru di bidang bahan bangunan dan konstruksi yaitu dengan *fly ash*. Campuran ini menghasilkan mortar dengan kuat tekan yang tinggi, ketahanan asam yang baik dan susut yang rendah. *Fly ash* dapat digunakan dalam pembuatan agregat ringan, sehingga agregat ini ringan karena adanya rongga udara dan digunakan dalam mortar ringan struktural untuk mengurangi beban mati struktur mortar dan mengarah pada penghematan ekonomi dalam hal desain struktural.

Abu Terbang (*fly ash*) mengandung zat aktif yang memiliki efek pozzolan (seperti CaO , SiO_2 dan Al_2O_3 , dll), sehingga dapat digunakan sebagai bahan campuran untuk produksi semen atau sebagai campuran mortar pengganti semen. Apabila abu terbang dicampurkan kedalam semen, maka akan terjadi efek homogenisasi dan pelumasan karena bentuknya sendiri, hidrasi abu terbang dapat mengisi celah pada material sehingga dapat meningkatkan kekuatan. Penambahan kapur dan *fly ash* dapat mengurangi koefisien permeabilitas setelah perawatan standar 28 hari. Penggunaan *fly ash* dapat mengisi semen dengan lebih baik melalui proses reaksi hidrasi. Pori-pori pada semen membuat struktur *fly ash* semakin padat. Karena laju reaksi hidrasi *fly ash* lebih lambat dibandingkan dengan semen Portland biasa, sebagian besar semen *fly ash* memiliki kelemahan yaitu kekuatan awal yang rendah karena *fly ash* tidak ikut dalam reaksi hidrasi pada tahap awal hidrasi semen, dan hanya digunakan untuk bahan pengisi (Wang 2022). Oleh karena itu berdasarkan Wang (2022), abu terbang memiliki manfaat yang beragam yaitu:

- a. Penyusun beton untuk jalan dan bendungan.
- b. Penimbun lahan bekas pertambangan.
- c. *Recovery magnetic, cenosphere*, dan karbon.
- d. Bahan baku keramik, gelas, batu bata, dan refraktori.
- e. Bahan penggosok (polisher).
- f. Filler aspal, plastik, dan kertas.
- g. Pengganti dan bahan baku semen.
- h. Aditif dalam pengolahan limbah (*waste stabilization*).
- i. Konversi menjadi zeolit dan adsorben.

2.3 Semen

Semen merupakan suatu bahan yang mempunyai sifat hidrolis yang membantu pengikatan agregat halus dan agregat kasar apabila tercampur dengan air serta mampu mengisi rongga-rongga antara agregat tersebut. Banyaknya kandungan semen akan berpengaruh terhadap kuat tekan suatu mortar. Apabila jumlah semen yang terlalu sedikit, berarti banyaknya air juga sedikit yang mengakibatkan adukan mortar sulit dipadatkan, sehingga kuat tekan mortar menjadi rendah. Kelebihan jumlah semen, berarti banyaknya air juga berlebihan sehingga mortar menjadi banyak pori dan mengakibatkan kuat tekan menjadi rendah.

1. Proses Produksi Semen

Semen merupakan bahan utama yang melepaskan gas rumah kaca yang merusak lingkungan. Produksi beton menyumbang 0.9 ton dari emisi karbon dioksida (CO₂) global tahunan yang sebagian besar berasal dari produksi semen. Kemungkinan limbah kaca menggantikan semen akan menjadi usaha manfaat lingkungan yang sangat layak. Ini akan mengurangi volume dan biaya pembuangan limbah kaca seharusnya ke tempat pembuangan sampah, sehingga bisa mengurangi biaya campuran kaca untuk digunakan dalam beton, dan mengurangi emisi gas rumah kaca karena berkurangnya penggunaan semen yang dibutuhkan karena penggantian.

2. Jenis-Jenis Semen

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI), terdapat beberapa jenis semen yaitu:

a. Semen *Portland/Ordinary Portland Cement* (OPC) SNI 15-2049-2004

Merupakan semen hidrolis yang dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland terutama yang terdiri dari kalsium silikat yang bersifat hidrolis dan digiling bersama-sama dengan tambahan berupa satu atau lebih bentuk kristal senyawa kalsium sulfat dan boleh ditambah dengan bahan pengunanya, diantaranya yaitu:

- 1) Jenis I (*ordinary portland cement*) yaitu semen portland untuk penggunaan umum yang tidak memerlukan persyaratan-persyaratan khusus seperti yang disyaratkan pada jenis-jenis lain.
- 2) Jenis II (*moderate sulfat resistance*) yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan terhadap sulfat atau kalor hidrasi sedang.
- 3) Jenis III (*high early strength portland cement*) yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kekuatan tinggi pada tahap permulaan setelah pengikatan terjadi.
- 4) Jenis IV (*low heat of hydration*) yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan kalor hidrasi rendah.
- 5) Jenis V (*sulfat resistance cement*) yaitu semen portland yang dalam penggunaannya memerlukan ketahanan tinggi terhadap sulfat.

b. Semen *Portland Putih* SNI 15-0129-2004

Merupakan semen hidrolis yang berwarna putih dan dihasilkan dengan cara menggiling terak semen portland putih yang terutama terdiri atas kalsium silikat Ca_2SiO_4 dan digiling bersama-sama dengan bahan tambahan berupa satu atau lebih bentuk senyawa.

c. Semen *Portland Pozzolan/Portland Pozzolan Cement* (PPC) SNI 15-0302-2004

Merupakan suatu semen hidrolis yang terdiri dari campuran yang homogen antara semen portland halus, yang diproduksi dengan menggiling semen portland dan pozzolan bersama-sama dengan kadar pozzolan 6% sampai dengan 40% masa semen portland pozzolan.

d. Semen *Portland Komposit/Portland Composite Cement* (PCC) SNI 15-7064-2004

Merupakan hasil pencampuran antara bubuk semen portland dengan bubuk bahan anorganik lain. Bahan anorganik ini terdiri dari pozzolan, senyawa silikat, batu kapur, dengan kadar total bahan anorganik 6%-35% dari massa semen portland komposit.

e. Semen *Portland* Campur SNI 15-3500-2004

Merupakan suatu bahan pengikat hidrolis hasil penggilingan bersama-sama dari terak semen Portland dan gips dengan satu atau lebih bahan anorganik yang bersifat tidak bereaksi.

f. Semen Masonry SNI 15-3758-2004

Merupakan semen yang digunakan terutama dalam pekerjaan menembok dan memplester konstruksi yang terdiri dari campuran semen portland atau campuran semen hidrolis dengan bahan yang bersifat menambah keplastisan (seperti bau kapur, kapur yang terhidrasi atau kapur hidrolis) bersamaan dengan bahan lain yang digunakan untuk meningkatkan satu atau lebih seperti waktu pengikatan, kemampuan kerja, daya simpan air, dan ketahanan.

Tabel 6. Sifat Fisik dan Kimia Semen

Sifat Fisik	
Variabel Pemanding	Karakteristik
Kehalusan Butir	80% lolos saringan 44 μm
Berat Jenis	3,15 g/cm^3
Waktu Pengikatan Awal	60-120 menit
Suhu Pengikatan	3500 $^{\circ}\text{C}$
Sifat Kimia	
Komponen Pemanding	% Rata-rata untuk Semen
Kapur (CaO)	60 sampai 65
Silika (SiO ₂)	17 sampai 25
Alumina (Al ₂ O ₃)	3 sampai 8
Besi (Fe ₂ O ₃)	0,5 sampai 6
Magnesia (MgO)	0,5 sampai 4
Sulfur (SO ₃)	1 sampai 1
Soda, Na ₂ O+K ₂ O	0,5 sampai 1

Sumber: Setiawati, 2018

2.4 Mortar

1. Definisi dan Penggunaan Mortar

Berdasarkan SNI 03-6825-2002 mortar didefinisikan sebagai campuran antara pasir, air dan semen portland dengan komposisi tertentu. Kuat tekan

mortar dipengaruhi oleh jumlah semen dalam campuran, perbandingan volume semen dan pasir. Kualitas dan mutu mortar ditentukan oleh bahan dasar, bahan tambahan, proses pembuatan dan alat yang digunakan. Semakin baik mutu bahan bakunya, komposisi perbandingan campuran yang direncanakan dengan baik dan proses pembuatan yang baik akan menghasilkan mortar yang berkualitas baik pula. (Sihombing 2018)

Fungsi atau penggunaan mortar ini sebagai bahan pengisi atau pengikat bagian penyusun suatu konstruksi yang bersifat secara struktural dan non struktural. Contoh penggunaan mortar untuk konstruksi yang bersifat struktural yaitu sebagai pasangan bata belah untuk pondasi, sedangkan non struktural yaitu untuk merekatkan pasangan bata untuk dinding.

Adapun macam-macam mortar adalah:

- a. Mortar lumpur (mud mortar), yaitu mortar dengan bahan perekat tanah.
- b. Mortar kapur, yaitu mortar dengan bahan perekat kapur
- c. Mortar semen, yaitu mortar dengan bahan perekat semen.

2. Jenis-Jenis Mortar

Berdasarkan ASTM C 270, *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry* menjelaskan standar mortar berdasarkan kekuatannya dibedakan sebagai berikut:

a. Mortar tipe M

Mortar tipe M adalah adukan dengan kuat tekan yang tinggi dan digunakan untuk dinding bata bertulang, pasangan pondasi, adukan pasangan pipa air kotor, adukan dinding penahan dan adukan untuk jalan. Kuat tekan minimumnya adalah 17,2 MPa.

b. Mortar tipe S

Mortar tipe S untuk struktur dengan kuat lekat lentur yang diperlukan untuk menahan beban lateral yang berasal dari tekanan tanah, angin, dan beban gempa. Mortar tipe S direkomendasikan untuk struktur pada atau dibawah tanah, serta yang selalu berhubungan dengan tanah, seperti pondasi, dinding penahan tanah, perkerasan, saluran pembuangan dan *mainhole*. Kuat tekan minimumnya adalah 12,4 MPa.

c. Mortar tipe N

Mortar tipe N merupakan mortar yang umum digunakan untuk konstruksi pasangan di atas tanah dan direkomendasikan untuk dinding penahan beban interior maupun eksterior. Mortar tipe N dengan kekuatan sedang biasa memberikan kesesuaian kuat tekan dan kuat lentur dari segi ekonomi untuk aplikasi konstruksi pasangan. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

d. Mortar tipe O

Mortar tipe O adalah mortar dengan kandungan kapur yang tinggi dan kuat tekan yang rendah dan direkomendasikan untuk dinding interior maupun eksterior yang tidak menahan beban struktur. Mortar tipe ini digunakan untuk pekerjaan setempat dengan biaya yang ekonomis. Kuat tekan minimumnya adalah 2,4 MPa.

e. Mortar tipe K

Mortar tipe K memiliki kuat tekan dan kuat lentur yang sangat rendah. Mortar tipe K jarang digunakan untuk konstruksi baru dan direkomendasikan dalam ASTM C 270 hanya untuk konstruksi bangunan lama yang umumnya menggunakan mortar kapur. Kuat tekan minimumnya adalah 5,2 MPa.

2.5 pH dalam Mortar

pH adalah suatu parameter yang digunakan untuk mengetahui atau menyatakan tingkat keasaman suatu larutan. Larutan asam mempunyai pH lebih kecil dari 7, larutan basa mempunyai pH lebih besar dari 7, sedangkan larutan netral mempunyai $\text{pH} = 7$. Cara yang digunakan untuk menentukan sifat dan pH larutan adalah dengan menggunakan indikator. Indikator tersebut yaitu kertas lakmus, pH meter, indikator universal, larutan fenolftalein, brom timol biru, metil merah, serta metil orange. (Wibowo, 2019)

pH merupakan faktor kunci dalam menentukan tingkat kapasitas suatu mortar, yang sebagian kerusakannya kritis yaitu seperti karbonasi, serangan asam dan korosi. Nilai pH beton yang rendah dan tinggi berbahaya bagi kekuatan, daya tahan dan masa pakai struktur bangunan beton. Daya tahan dan keberlanjutan bangunan beton secara langsung dipengaruhi oleh nilai pH-nya. pH beton menurun karena konsumsi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dalam pengembangan produk hidrasi. Penurunan pH beton dari

nilai awalnya menurunkan keasaman cairan pori, sehingga membuat produk hidrasi menjadi tidak stabil. Penurunan pH beton juga menurunkan jumlah CaCO_3 . Penurunan pH campuran beton sebelum pengecoran dan pencetakan juga mempengaruhi hidrasi dan kekuatan beton awal tetapi meningkatkan sifat-sifatnya pada tahap selanjutnya. Jika pH menurun, efek destruktif meningkat dan mengarah pada pembentukan beton berpori dengan kekuatan rendah. (Yousuf, 2020)

Pengurangan pH beton menyebabkan pengelupasan penutup beton karena terjadi korosi, sehingga mengurangi kinerja keseluruhan dan masa layanan struktur beton. Dalam pekerjaan konstruksi, jika pH beton antara 9 dan 11 maka permukaan dapat menahan kondisi cuaca yang bervariasi. Jika pH antara 7 dan 9, beton mulai rusak dan mungkin menunjukkan tanda-tanda kerusakan dini, apabila pH turun sekitar 6 maka akan terjadi kerusakan. Penurunan pH disebabkan oleh proses karbonasi, yaitu Ca(OH)_2 menjadi CaCO_3 yang dapat menurunkan pH beton bahkan kurang dari 9. Karbonasi adalah proses yang melibatkan reaksi kimia Ca(OH)_2 dan kalsium silikat hidrat (C-S-H) dengan CO_2 untuk menghasilkan CaCO_3 dan H_2O . (Yousuf, 2020)



Gambar 2. Karbonasi saat Penurunan pH

Sumber: Yousuf, dkk 2020

Selain itu, apabila pH beton yang tinggi dapat merangsang ASR karena menyebabkan fase silika dari agregat bereaksi selama ASR sehingga bisa meningkatkan retak dan kerusakan. pH yang sangat tinggi $>13,5$ dapat menyebabkan besarnya pemuaiannya dan kerusakan selanjutnya yang terjadi pada beton akibat ASR tergantung pada banyak faktor, seperti alkali dalam beton, jumlah dan sifat silika reaktif dalam agregat, suhu, dan kelembaban. (Yousuf, 2020)



Gambar 3. Retak di Dinding Penahan

Sumber: Yousuf, dkk 2020

Bahan tambahan semen mempengaruhi hidrasi semen campuran dengan cara fisik yaitu terjadi pada serbuk halus atau bahan pengisi dan mengikuti reaksi kimia untuk membentuk produk hidrasi. Dalam semen campuran pada usia hidrasi awal, kekuatan pendorong utamanya adalah pH, aktivitas air dan komposisi pori-larutan. Adapun fungsi pH dalam suatu larutan yaitu untuk memperkirakan tingkat reaksi abu terbang dalam campuran yang bergantung pada pH larutan pori. (Yousuf, 2020)

2.6 Emisi

Berdasarkan Permen LHK Nomor 9 Tahun 2014, emisi merupakan zat, energi, dan/atau komponen lain yang berasal dari suatu kegiatan yang masuk dan/atau dimasukkannya ke dalam udara ambien yang mempunyai dan/atau tidak mempunyai potensi sebagai unsur pencemar.

1. Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Berdasarkan Direktorat Inventarisasi dan Pemantauan Sumber Daya KLHK Tahun 2015, emisi yaitu proses terbebasnya gas rumah kaca ke atmosfer, dari bahan yang bersifat organik baik dari mikroba yang dapat mengeluarkan gas CO₂ atau CH₄. Emisi karbon dioksida (CO₂) adalah salah satu jenis emisi gas rumah kaca yang menjadi faktor utama timbulnya fenomena pemanasan global. Dalam Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12/M-IND/PER/1/2012 tentang Peta Panduan (*RoadMap*) Pengurangan Emisi CO₂ Industri Semen ditetapkan pengurangan terhadap emisi karbon sebesar 2% dalam kurun waktu

2011 dan 3% untuk kurun waktu 2016-2020.

2. Penyebab Emisi Karbon Dioksida (CO₂)

Produksi emisi gas karbon dioksida (CO₂) erat kaitannya dengan aktivitas manusia (*anthropogenic activities*). Menurut *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), terdapat 5 sektor yang menjadi sumber utama emisi CO₂ yaitu penggunaan energi, proses industri dan penggunaan produk, PKPL (pertanian, kehutanan dan penggunaan lahan), serta limbah. Untuk mencapai komitmen penurunan emisi CO₂ sebesar 26% (Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional/BAPPENAS, 2011). Perlu adanya upaya mitigasi dalam bentuk kontrol seluruh aktivitas yang berpotensi memproduksi CO₂. Walaupun secara umum sektor industri memberikan kontribusi rendah terhadap pertumbuhan emisi CO₂, apabila tidak diberlakukannya skenario kebijakan untuk mengontrol pertumbuhan produksi emisi CO₂ dari sektor tersebut, risiko pertumbuhan emisi dapat meningkat.

3. Dampak Emisi

Pemanasan global menyebabkan suhu rata-rata Indonesia mengalami kenaikan dan penurunan di setiap tahunnya. Kejadian tersebut merupakan akibat dari perubahan suhu yang memiliki konsentrasi paling besar dari gas CO₂ yang dihasilkan sektor transportasi dan industri sehingga mengakibatkan pemanasan global (Rachmayanti & Mangkoediharjo, 2020). Data dari sektor industri menurut Dinas Lingkungan Hidup (DLH) sejak revolusi industri, 150 tahun terakhir tingkat CO₂ meningkat dari 280-379 part per million (ppm) (DLH 2019).

Dampak tingginya kadar CO₂ bagi kesehatan manusia menurut Safitri (2022) menyebabkan penyakit asidosis respiratorik dimana keasaman darah yang berlebihan akibat adanya penumpukan karbondioksida dalam darah sehingga tubuh kekurangan O₂. Dampak tingginya kadar CO₂ bagi lingkungan yaitu dapat meningkatkan suhu bumi dan menyebabkan efek rumah kaca (Faradilla et al., 2016 dalam Safitri, 2022). Meningkatnya suhu bumi karena adanya konsentrasi gas rumah kaca yang bertambah di atmosfer sehingga menyebabkan bumi semakin panas. Efek rumah kaca disebabkan oleh gas CO₂ yang ada di atmosfer.

4. Emisi Karbon Dioksida (CO₂) dalam Bidang Konstruksi

Industri bangunan menyumbang sekitar 36% dari penggunaan energi akhir dan 36% dari emisi CO₂ pada skala global, 11% di antaranya dihasilkan dari pembuatan bahan bangunan, termasuk semen (Arcas et al.,2022). Menurut data dari IEA, 23.2% dari emisi gas rumah kaca disebabkan oleh industri konstruksi. Di industri konstruksi, sumber-sumber emisi gas rumah kaca utama adalah keperluan energi untuk pembuatan bahan baku, yaitu baja dan semen. Ada juga emisi dari reaksi kimia dimana kapur yang dipanaskan menjadi semen dan karbon dioksida. Dengan pentingnya industri konstruksi untuk kemakmuran manusia, industri tidak dapat dihentikan. Maka, industri konstruksi harus mengurangi emisi gas rumah kaca dengan mengidentifikasi sumber-sumber emisi gas rumah kaca dan mencari mitigasi emisi-emisi tersebut.

Elemen yang paling banyak memakan energi dalam pembuatan mortar yaitu semen. Semen menghasilkan bahaya lingkungan dengan emisi gas rumah kaca yang besar diperkirakan melepaskan 0.9 ton CO₂ (Ramakrishnan, 2017). Penggunaan campuran lain seperti *fly ash* sebagai pengganti semen dalam produksi mortar akan membantu meminimalkan CO₂ emisi selama produksi semen. Penggunaan mortar yang meningkat dan berlebihan ini akan menimbulkan dampak negatif seperti mengganggu keseimbangan lingkungan serta merusak sumber daya alam. Oleh sebab itu, solusi yang efektif untuk mereduksi penggunaan tersebut yaitu menggunakan mortar ramah lingkungan yang dalam produksinya menghasilkan lebih sedikit CO₂.

Mortar umumnya digunakan dalam industri konstruksi untuk dua tujuan utama: struktural, yang fungsi utamanya adalah untuk menyambung elemen struktural, seperti batu bata keramik, dan tujuan pelapisan, jika diberikan pada penyangga yang kuat. Komponennya adalah bahan pengikat (semen dan/ atau kapur), agregat halus (biasanya pasir), dan air; proporsi pengikat, pembuatannya, dan sifat utamanya diatur oleh standar konstruksi. Masalah utama adalah bahwa semen adalah penyebab utama kekuatan mekanis mortar, tetapi juga konduktivitas termal yang tinggi. Selain itu, membutuhkan energi yang cukup besar untuk memproduksinya. Semen mengurangi volume pori dan ukuran pori dari produk akhir, sehingga membatasi masuknya udara. Salah satu

pemanfaatan mortar ramah lingkungan yaitu dengan pemanfaatan limbah sisa industri seperti limbah lampu.

2.7 Penelitian Terdahulu

Adapun beberapa penelitian terdahulu dengan tema atau kajian yang serupa yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian oleh Muharram Wijaya Kusuma, Ernawati Sri Sunarsih, Taufiq Lilo Adi Sucipto (2020) dengan judul “Pemanfaatan Limbah Kaca Sebagai Pengganti Sebagian Volume Pasir dan *Fly Ash* 20% sebagai Bahan Pengganti Semen Ditinjau dari Kuat Tekan dan Berat Jenis Beton dalam Lingkungan Agresi Sulfat 5%”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi penggunaan limbah kaca dan *fly ash* sebagai pengganti semen terhadap kuat tekan dan berat jenis beton pada lingkungan. Penelitian ini terdiri beberapa variasi yaitu 0%, 10%, 20%, 30%, dan 40% dengan satu variasi yaitu empat sampel dengan variabel utama yaitu serbuk kaca dan *fly ash*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan limbah kaca dan *fly ash* sebagai pengganti semen berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan pada lingkungan, serta penambahan serbuk kaca 20% memiliki ketahanan yang lebih baik daripada beton normal maupun beton dengan variasi lainnya pada selisih kuat tekan dan berat jenis setelah melakukan uji peyerapan air (perendaman).
2. Penelitian oleh M Praba, S Vanitha, J. Samuel Simron Rajkumar dengan judul “Mengidentifikasi Kelestarian Beton secara Parsial Penggantian Semen dengan Bubuk Kaca”. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui limbah kaca sebagai pengganti semen dan mengukur karakteristik kekuatan beton melalui uji tarik belah serta sebagai alternatif dalam beton untuk mengurangi bahan limbah padat yang efektif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bubuk kaca yang digunakan dalam beton mengurangi biaya satuan beton dan juga menurunkan biaya pengirimannya. Penggunaan bubuk kaca akan membatasi biaya TPA dan pada hitungan itu meningkatkan biaya pasar dalam kaca daur ulang. Limbah kaca dikatakan pasti berkontribusi sebagai struktur mikro yang sifatnya menghasilkan peningkatan nyata dari kinerja mekanisnya.

3. Penelitian oleh Cahyo Didit Prasetyo, Ernawati Sri Sunarsih, Taufiq Lilo Adi Sucipto (2020) dengan judul “Kajian Pemanfaatan Limbah Kaca sebagai Pengganti Agregat Halus dan *Fly Ash* 30% dari Berat Semen ditinjau dari Kuat Tarik Belah, Daya Serap dan Porositas Beton”. Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh limbah kaca sebagai bahan pengganti agregat halus terhadap kuat tarik beton. Penelitian ini terdiri beberapa variasi yaitu 30%, 40%, 50%, 60%, 70% penambahan proporsi abu terbang (*fly ash*) dengan metode eksperimental. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi pengganti serbuk kaca sebagai agregat halus menghasilkan kelebihan tarik beton maksimal terdapat pada kelebihan serbuk kaca 10% yaitu sebesar 2,258 MPa, Persentase serbuk kaca optimal sebagai pengganti agregat halus yang menghasilkan serap beton minimal terdapat pada jumlah serbuk kaca 10% yaitu 6,407%, Persentase serbuk kaca optimal sebagai pengganti agregat halus yang menghasilkan porositas beton minimal terdapat jumlah serbuk kaca sebesar 10% yaitu sebesar 14.006%
4. Penelitian oleh Akram Shakir Mahmoud, Mohamed Mahir Yassen, Sheelan Mahmoud Hama (2019) dengan judul “Pengaruh Bubuk Kaca sebagai Penggantian Sebagian dari Semen pada Kekuatan Beton dan Tegangan-Regangan Hubungan”. Penelitian ini terdiri beberapa variasi yaitu 10%, 15% dan 20% serbuk kaca. Hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran yang mengandung serbuk kaca bekas sebagai pengganti semen menunjukkan peningkatan masing-masing sebesar 53% dibandingkan dengan campuran kontrol pada umur 28 hari.
5. Penelitian oleh Siska Apriwelni dan Nugraha Bintang Wirawan (2020) dengan judul “Kuat Tekan Beton Mutu Tinggi dengan Memanfaatkan *Fly Ash* dan Bubuk Kaca Sebagai Bahan Pengisi”. Penelitian ini terdiri dari beberapa variasi yaitu persentase 0%, 5%, 10%, 15%, dan 20%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin bertambahnya jumlah persentase serbuk kaca yang digunakan menunjukkan bahwa kuat tekan beton semakin bertambah juga. Penambahan *fly ash* pada campuran beton mempengaruhi kuat tekan beton yang dihasilkan. Pada variasi *fly ash* 0% memiliki kuat tekan tertinggi baik pada saat campuran serbuk kaca 5% dan 10%. Variasi *fly ash* 15% adalah

kondisi optimum campuran beton dengan kuat tekan beton yaitu 43,31 Mpa. Kedua limbah ini dapat dikombinasikan dan dimanfaatkan dengan baik dan digunakan dalam pembuatan beton mutu tinggi.