

**STUDI KUAT TEKAN DAN DURABILITAS MORTAR
GEOPOLIMER BERBAHAN FLY ASH DAN TRASS**

***STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY OF
FLY ASH AND TRASS BASED GEOPOLYMER MORTAR***

SANDRI LINNA SENGKEY

NIM: D013171025



**PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2021**

**STUDI KUAT TEKAN DAN DURABILITAS MORTAR
GEOPOLIMER BERBAHAN FLY ASH DAN TRASS**

Disertasi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Doktor

Program Studi

Teknik Sipil

Disusun dan diajukan oleh

SANDRI LINNA SENGKEY

Kepada

PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK SIPIL

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2021

LEMBAR PENGESAHAN DISERTASI

STUDI KUAT TEKAN DAN DURABILITAS MORTAR GEOPOLIMER BERBAHAN FLY ASH DAN TRASS

STUDY OF COMPRESSIVE STRENGTH AND DURABILITY OF FLY ASH AND TRASS BASED GEOPOLYMER MORTAR

disusun dan diajukan oleh :

SANDRI LINNA SENGKEY

D013171025

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka penyelesaian studi Program Doktor Program Studi Doktor Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Pada Tanggal 13 Desember 2021

dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Promotor,



Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT

NIP. 197206192000122001

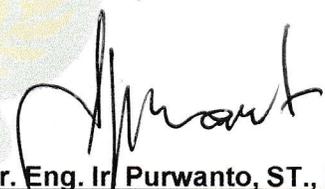
Co Promotor,

Co Promotor,



Dr. Eng. Ir. Muralia Hustim, ST., MT

NIP. 197204242000122001



Dr. Eng. Ir. Purwanto, ST., MT

NIP. 197111282005011002

Ketua Program Studi,

Dekan Fakultas Teknik,



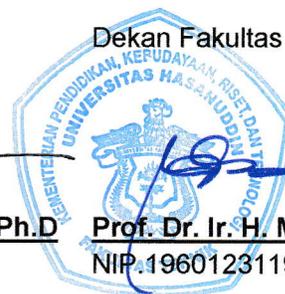
Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D

NIP. 196404221993031001



Prof. Dr. Ir. H. Muh. Arsyad Thaha, MT

NIP. 196012311986091001



PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI

Yang bertanda tanga dibawah ini

Nama : Sandri Linna Sengkey
Nomor Mahasiswa : D013171025
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S3

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulis berjudul

**STUDI KUAT TEKAN DAN DURABILITAS MORTAR GEOPOLIMER
BERBAHAN FLY ASH DAN TRASS**

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

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

Makassar, 15 Desember 2021

Yang menyatakan



SANDRI LINNA SENGKEY

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan Yesus Kristus, atas pertolongan, hikmat dan rahmat yang dianugerahkan sehingga penyusunan disertasi dengan judul “**Studi Kuat Tekan dan Durabilitas Mortar Geopolimer Berbahan *Fly Ash* dan Trass**” dapat terselesaikan.

Ide yang melatarbelakangi penulisan disertasi ini adalah bagaimana memanfaatkan trass yang banyak terdapat di Indonesia dalam pembuatan mortar geopolimer. Kandungan unsur silica yang tinggi dari trass diharapkan dapat memberi pengaruh dalam pembuatan mortar geopolimer. Penelitian ini mengkombinasikan pozolan alam trass dan pozolan buatan fly ash dalam pembuatan mortar geopolimer, dimana fly ash sebagai precursor dan trass sebagai pengganti sebagian pasir. Melalui hasil disertasi ini dapat menjelaskan pengaruh penggunaan trass sebagai bahan substitusi pasir dalam pembuatan mortar geopolimer berbahan fly ash terhadap kuat tekan dan durabilitas mortar pada siklus basah kering.

Dalam penelitian dan penulisan disertasi, penulis mendapat banyak dukungan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh sebab itu, dengan penuh kerendahan hati penulis ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada:

1. Dr.Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT, selaku Promotor yang selalu meluangkan waktu untuk memberi bimbingan, arahan, masukan, serta ide-ide sejak tahap penyusunan usulan penelitian hingga tahap akhir penulisan disertasi.
2. Dr.Eng. Ir. Muralia Hustim, ST., MT, selaku Co-Promotor I yang selalu meluangkan waktu untuk membimbing dan memberikan banyak masukan, arahan serta saran-saran untuk penyempurnaan hasil disertasi ini.

3. Dr.Eng. Purwanto, ST., MT, selaku Co-Promotor II yang selalu meluangkan waktu untuk membimbing dan memberikan banyak masukan, saran serta semangat dalam penyelesaian disertasi ini.
4. Prof. Dr. Ir. H. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng; Prof. Dr.-Ing. Ir. Herman Parung, M.Eng; Dr. Ir. Abdul Rachman Djamaluddin, MT; Dr.Eng. Ir. Andi Arwin Amiruddin, ST., MT, selaku dosen penguji internal dan Dr.Eng. Januarti Jaya Ekaputri, ST., MT selaku dosen penguji eksternal yang banyak memberikan masukan dan saran guna penyempurnaan naskah disertasi ini

Secara khusus penulis ingin mengucapkan terimakasih dan penghargaan yang tinggi kepada:

1. Ditjen Sumber Daya Ilmu Pengetahuan, Teknologi dan Pendidikan Tinggi, Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang sudah mendukung dan menjadi sponsor pendanaan bagi penulis dalam bentuk Beasiswa Pendidikan Pascasarjana Dalam Negeri (BPPDN).
2. Rektor Universitas Hasanuddin, Prof. Dr. Dwia Aries Tina Pulubuhu, MA; Direktur Sekolah Pascasarjana Universitas Hasanuddin, Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc, Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Prof. Dr. Ir. Muhammad Arsyad Thaha, MT; Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Prof. Dr. Ir. H. Wihardi Tjaronge, ST., M.Eng; dan Ketua Program Studi S3 Teknik Sipil Universitas Hasanuddin, Prof. Ir. Sakti Adji Adisasmita, M.Si., M.Eng.Sc., Ph.D. beserta seluruh dosen Pascasarjana Universitas Hasanuddin yang telah mengajar dan membuka wawasan terhadap ilmu pengetahuan yang lebih luas selama proses perkuliahan. Juga kepada ibu Hana dan ibu Diana selaku staf Pascasarjana dan Prodi S3 Teknik Sipil yang sangat membantu dalam proses administrasi sampai tahap akhir ini.
3. Direktur Politeknik Negeri Manado dan Ketua Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Manado yang telah memberikan bantuan dan

kesempatan kepada penulis untuk dapat melanjutkan studi pada program Doktor Teknik Sipil di Universitas Hasanuddin Makassar.

4. Kepala Laboratorium Uji Material Politeknik Negeri Manado, Bpk Berty Slat, ST., MT; Kepala Laboratorium Uji Tanah Politeknik Negeri Manado Bpk. Fery Sondakh, ST., MT beserta Alfrit Supit, SST; Sutikno, SST, dan Ronny Tampi selaku teknisi dan laboran yang telah banyak membantu penulis selama melakukan penelitian di laboratorium.
5. Rekan-rekan mahasiswa S3 Teknik Sipil, khususnya angkatan 2017 terutama Dr. Geertje Efraty Kandiyoh, ST., M.Eng; Olivia Moningka, ST., M.Ars; Denny Pinasang, SST., MT dan Dr. Ir. Herman Tumengkol, SST., MT, IPM atas kebersamaan dalam menjalani studi dan saling memberi semangat serta motivasi untuk tetap konsisten menyelesaikan pendidikan.
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan moril dan material selama proses studi, penelitian dan penyelesaian studi.

Penulis dengan penuh kerendahan hati, memberikan penghargaan kepada kedua orang tua tercinta ibunda Mike Onny Mamahit (almh.) dan ayahanda Benny Ferry Sengkey (alm.) yang telah merawat, membesarkan, mendidik dengan penuh kasih serta tidak pernah henti mendoakan penulis, semasa masih hidup.

Penulis mempersembahkan disertasi ini kepada suami tercinta Joudy Weru, SH., M.Th yang senantiasa mendoakan dan terus memberikan semangat dan motivasi terlebih saat menjalani masa-masa sulit dalam proses penelitian dan penyelesaian studi. Juga kepada anak-anak terkasih Joshua J. Weru, S.Tr.T, Nefrit J. Weru dan Aviel Mike J. Weru atas pengertian, kesabaran serta dukungan doa selama penulis menempuh studi.

Penulis menyadari sepenuhnya, penyusunan disertasi ini masih jauh dari sempurna, oleh sebab itu dengan segala kerendahan hati penulis mohon

kritik, saran serta masukan yang membangun demi kebaikan dan penyempurnaan disertasi ini.

Makassar, Desember 2021

Penulis,

Sandri Linna Sengkey

ABSTRAK

SANDRI LINNA SENGKEY. *Studi Kuat Tekan dan Durabilitas Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash dan Trass* (dibimbing oleh Rita Irmawaty, Muralia Hustim, dan Purwanto).

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh kandungan trass sebagai pengganti sebagian pasir dalam mortar geopolimer berbasis fly ash terhadap waktu pengikatan, workability, kekuatan tekan, penyerapan, porositas, ketahanan terhadap sodium sulfat (Na_2SO_4) dan larutan air dengan siklus basah-kering serta mikrostruktur. Campuran mortar geopolimer dibuat dengan komposisi NaOH 10 M, rasio pasir/FA 2.0, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ 2.5, rasio alkali aktivator/fly ash 0.5 dan perawatan dalam ruangan. Kandungan trass sebesar 0%, 10%, 20%, dan 30% dari berat pasir. Hasil penelitian menunjukkan bahwa waktu pengikatan lebih singkat dan flow mortar menurun dengan meningkatnya substitusi trass. Penyerapan, porositas, dan kehilangan berat pada larutan sodium sulfat dan air menunjukkan nilai minimum, sedangkan kekuatan tekan menunjukkan hasil maksimum pada substitusi trass sebesar 20%. Mortar geopolimer memiliki ketahanan yang lebih baik dalam larutan sodium sulfat daripada dalam air. Hasil SEM menunjukkan pembentukan mortar yang lebih padat dan retak mikro yang lebih sedikit dengan substitusi trass. Analisis XRD menunjukkan bahwa substitusi trass meningkatkan kandungan fasa albite $\text{Na}(\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$ atau gel N-A-S-H yang berperan penting dalam meningkatkan kekuatan tekan dan durabilitas mortar geopolimer.

Kata Kunci: Durabilitas, Fly ash, Geopolimer, Kekuatan tekan, Siklus basah kering, Trass

ABSTRACT

SANDRI LINNA SENGKEY. *Study of Compressive Strength and Durability of Fly Ash and Trass Based Geopolymer Mortar* (supervised by Rita Irmawaty, Muralia Hustim, and Purwanto).

In this research, the effect of trass content as a partial replacement of sand in fly ash based geopolymer mortar on setting time, workability, compressive strength, absorption, porosity, resistance in sodium sulfate (Na_2SO_4) and water solutions with wet-dry cycles and microstructure were studied. The geopolymer mortar mixtures were made with NaOH 10 M, sand/fly ash ratio of 2.0, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ratio of 2.5, alkali activator/fly ash ratio of 0.5 and indoor curing. Trass content of 0%, 10%, 20%, and 30% by weight of sand. The results showed that the setting time was shorter and the mortar flow decreased with increasing trass substitution. Absorption, porosity, and weight loss in Na_2SO_4 and water solutions showed the minimum values, while the compressive strength showed maximum results in trass substitution of 20%. The geopolymer mortar has better resistance in sodium sulfate solution than in water. The SEM results showed the formation of a denser mortar and fewer micro-cracks with trass substitution. XRD analysis shows that trass substitution increases the content of albite phase $\text{Na}(\text{Al Si}_3 \text{O}_8)$ or N-A-S-H gel which played an important role in increasing the compressive strength and durability of geopolymer mortar.

Key words: Compressive strength, Durability, Fly ash, Geopolymer, Trass, Wet-dry cycles

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR JUDUL	li
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
KATA PENGANTAR	v
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
DAFTAR SINGKATAN	xxii
I. PENDAHULUAN	1
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah	7
C. Tujuan Penelitian	7
D. Manfaat Penelitian	8
E. Batasan Masalah	9
II. TINJAUAN PUSTAKA	11
A. Hubungan Isu Lingkungan Dengan Produksi Beton	11

B. Kajian Pustaka	12
1. Kekuatan tekan material geopolimer berbahan pozolan alam dan pozolan buatan	12
2. Durabilitas geopolimer berbahan pozolan alam dan pozolan buatan	14
3. Penggunaan bahan substitusi agregat dalam pembuatan geopolimer	18
4. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan dan durabilitas geopolimer	19
C. Landasan Teori	31
1. Teori geopolimer	31
2. Material pembentuk geopolimer	33
3. Kelebihan dan kekurangan geopolimer	34
D. Material Penyusun Mortar Geopolimer	36
1. Fly ash	36
2. Trass	38
3. Agregat halus	39
4. Alkali Aktivator	39
E. Kerangka Pikir Penelitian	42
III. METODOLOGI PENELITIAN	43
A. Bagan Alir Penelitian	43
B. Lokasi Penelitian	46
C. Jenis Penelitian dan Sumber Data	46
D. Alat dan Bahan Penelitian	47

E. Prosedur Penelitian	48
1. Pemeriksaan karakteristik material	48
2. Trial mix mortar geopolimer fly ash tanpa trass (Tahap I)	50
3. Pembuatan mortar geopolimer fly ash (tahap I)	50
4. Pengujian workabilitas dan kekuatan tekan mortar geopolimer fly ash	53
5. Analisa tahap I	54
6. Pembuatan mortar geopolimer fly ash dengan substitusi trass terhadap pasir (tahap II)	54
7. Pengujian waktu pengikatan (setting time)	56
8. Pengujian workabilitas dan kekuatan tekan mortar geopolimer fly ash dengan substitusi trass pada pasir	57
9. Pengujian penyerapan (absorpsi)	57
10. Pengujian porositas	58
11. Pengujian durabilitas	59
12. Pengujian mikrostruktur	62
13. Analisa tahap II	62
IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	63
A. Karakteristik Material Penyusun Mortar Geopolimer	63
1. Karakteristik agregat halus pasir	63
2. Trass	64
3. Fly ash	66
4. Bahan alkali activator	68

B. Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash (Tahap I)	69
1. Penentuan campuran kontrol (tanpa substitusi trass)	69
2. Workabilitas mortar geopolimer berbahan fly ash	69
3. Kekuatan tekan mortar geopolimer berbahan fly ash	73
C. Mortar Geopolimer Berbahan Fly Ash dengan Substitusi Trass pada Pasir (Tahap II)	78
1. Komposisi campuran mortar geopolimer berbahan fly ash dengan mengganti sebagian pasir dengan trass	78
2. Waktu pengikatan pasta geopolimer berbahan fly ash dengan penambahan trass	79
3. Workabilitas mortar geopolimer berbahan fly ash dengan mengganti sebagian pasir dengan trass	80
4. Kekuatan tekan mortar geopolimer berbahan fly ash dengan mengganti sebagian pasir dengan trass	82
5. Penyerapan dan porositas	88
6. Durabilitas mortar geopolimer terhadap sodium sulfat dan air tawar	91
7. Scanning electron microscope-energy dispersive x-ray	98
8. X-ray diffraction (XRD)	105
9. Hubungan penyerapan dan porositas mortar	106
10. Hubungan kuat tekan dan durabilitas	109
11. Temuan empirik/novelty	112
V. KESIMPULAN DAN SARAN	113
A. Kesimpulan	113
B. Saran	114

DAFTAR PUSTAKA

115

LAMPIRAN

123

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Persyaratan kandungan kimia pozzolan (ASTM C 618-19)	37
2. Jenis dan standar pengujian karakteristik fly ash	49
3. Jenis dan standar pengujian karakteristik trass	49
4. Jenis dan standar pengujian karakteristik agregat halus (pasir)	49
5. Daftar sampel pembuatan mortar geopolimer tahap I	51
6. Daftar sampel pembuatan mortar geopolimer fly ash dengan substitusi trass pada pasir (tahap II)	55
7. Hasil pengujian karakteristik pasir	63
8. Senyawa oksida dari fly ash dan trass hasil analisa XRF	67
9. Nilai flow dan kekuatan tekan mortar geopolimer berbahan fly ash	70
10. Proporsi campuran untuk 1 M ³ mortar geopolimer	78
11. Nilai flow mortar geopolimer dengan variasi jumlah trass	80
12. Kriteria workabilitas mortar geopolimer (Ghosh, 2012)	81
13. Perubahan berat mortar geopolimer dengan variasi trass	93
14. Elemen dalam mortar geopolimer berdasarkan analisa EDX	102
15. Hasil analisa XRD pada mortar geopolimer umur 28 hari	106
16. Hasil perhitungan porositas berdasarkan persamaan	107
17. Pengaruh substitusi trass terhadap kekuatan tekan, penyerapan, porositas, dan durabilitas mortar geopolimer fly ash	109
18. Perbandingan nilai durabilitas mortar berdasarkan hasil percobaan dan hasil persamaan	111

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Tipe struktur dan polisialate (Suwan T., 2016)	32
2. Kerangka piker penelitian	42
3. Bagan alir penelitian	43
4. Bahan-bahan untuk pembuatan mortar geopolimer	48
5. Pengujian karakteristik material	49
6. Proses curing sampel	53
7. Pengujian waktu pengikatan	56
8. Pengujian workabilitas dan kekuatan tekan mortar	57
9. Pengujian durabilitas mortar geopolimer	61
10. Karakteristik endapan trass di daerah Koka, Minahasa	64
11. Bentuk butiran trass	65
12. Hasil pengujian XRD dari trass	66
13. Bentuk butiran fly ash	68
14. Hasil pengujian XRD dari fly ash	68
15. Hubungan molaritas NaOH dengan flow mortar geopolimer	71
16. Hubungan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dengan flow mortar geopolimer	71
17. Hubungan activator/fly ash dengan flow mortar geopolimer	72
18. Hubungan molaritas NaOH terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer	74

19. Hubungan activator/fly ash terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer	74
20. Hubungan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer	76
21. Hubungan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ pada konsentrasi NaOH 10 M terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer	76
22. Waktu pengikatan pasta geopolimer fly ash dengan penambahan trass	79
23. Hubungan besarnya substitusi trass terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer	83
24. Perbandingan kekuatan tekan pada umur 28 hari terhadap campuran mortar tanpa trass	84
25. Hubungan umur dengan kekuatan tekan mortar geopolimer	86
26. Hubungan dalam bentuk persamaan antara substitusi trass dan kekuatan tekan mortar geopolimer	87
27. Perbandingan kekuatan tekan mortar geopolimer hasil pengujian dan hasil persamaan	88
28. Hubungan substitusi trass pada pasir terhadap penyerapan mortar geopolimer fly ash	90
29. Hubungan substitusi trass pada pasir terhadap porositas mortar geopolimer fly ash	90
30. Siklus basah kering dalam air tawar	92
31. Siklus basah kering dalam sodium sulfat	92
32. Hubungan substitusi trass pada pasir terhadap kehilangan berat mortar geopolimer fly ash	94
33. Mortar yang direndam dalam air tawar	97
34. Hasil analisa SEM	99

35. Hasil analisa SEM terhadap mortar yang direndam dalam larutan Na_2SO_4	104
36. Hubungan antara penyerapan dan porositas mortar	107
37. Perbandingan nilai porositas hasil pengujian dan hasil persamaan	108
38. Hubungan antara kekuatan tekan dengan durabilitas mortar geopolimer fly ash dengan substitusi trass pada pasir	110
39. Hubungan nilai durabilitas mortar dalam larutan Na_2SO_4 antara hasil percobaan dan hasil persamaan	111
40. Hubungan nilai durabilitas mortar dalam larutan air tawar antara hasil percobaan dan hasil persamaan	112

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Hasil pengujian berat isi agregat halus	123
2. Hasil pengujian berat jenis agregat halus	124
3. Hasil pengujian analisa saringan pasir	125
4. Hasil pengujian kadar lumpur pasir	126
5. Hasil pengujian kadar organik pasir	127
6. Hasil pengujian berat jenis fly ash	128
7. Hasil pengujian berat jenis trass	129
8. Hasil pengujian hidrometer fly ash	130
9. Hasil pengujian hidrometer trass	131
10. Hasil pengujian kekuatan tekan mortar geopolimer tahap I	132
11. Hasil pengujian kekuatan tekan mortar geopolimer tahap II	134
12. Hasil pengujian penyerapan dan porositas mortar geopolimer	135
13. Hasil pengujian ketahanan mortar geopolimer dalam larutan sodium sulfat	136
14. Hasil pengujian ketahanan mortar geopolimer dalam larutan air tawar	137
15. Perhitungan proporsi campuran mortar geopolimer	138
16. Hasil analisa EDX mortar A (0% trass) umur 7 hari	140
17. Hasil analisa EDX mortar A (0% trass) umur 28 hari	141
18. Hasil analisa EDX mortar B (10% trass) umur 28 hari	142

19. Hasil analisa EDX mortar C (20% trass) umur 28 hari	143
20. Hasil analisa EDX mortar D (30% trass) umur 28 hari	144
21. Hasil analisa XRD mortar A (0% trass) umur 28 hari	145
22. Hasil analisa XRD mortar B (10% trass) umur 28 hari	146
23. Hasil analisa XRD mortar C (20% trass) umur 28 hari	147
24. Hasil analisa XRD mortar D (30% trass) umur 28 hari	148
25. Hasil analisa XRF fly ash	149
26. Hasil analisa XRF trass	150
27. Hasil pengujian berat jenis NaOH dan Na ₂ SiO ₃	151
28 Surat keterangan pengujian XRD	152
29. Surat keterangan pengujian laboratorium	153
30. Dokumentasi pengujian di laboratorium	154

DAFTAR SINGKATAN

Singkatan	Arti dan keterangan
GRK	Gas rumah kaca
CO ₂	Karbon dioksida
SNI	Standar Nasional Indonesia
ASTM	American Society for Testing and Materials
GGBFS	<i>Ground Granulated Blast Furnace Slag</i>
Ca(OH) ₂	Kalsium hidroksida
ACI	American Concrete Institute
NaOH	Sodium hidroksida, natrium hidroksida
Na ₂ SiO ₃	Sodium silikat, natrium silikat
M	Molaritas, ukuran kekentalan larutan
OPC	Ordinary Portland Cement
KOH	Kalium hidroksida, potassium hidroksida
K ₂ SiO ₃	Kalium silikat, potassium silikat
Na ₂ SO ₄	Sodium sulfat, natrium sulfat
MPa	Mega pascal, satuan tekanan
°C	Celsius, satuan temperatur
Si-O-Al	Silica-oksida-alumina, Ikatan kimia
C-S-H	<i>calcium silicate hydrate</i> , ikatan kimia

N-A-S-H	<i>Sodium aluminosilicate hydrate</i> , ikatan kimia
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
EDX	<i>Energy Dispersive X-Ray spectroscopy</i>
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i>
XRD	<i>X-Ray Diffraction</i>
GTA	<i>Gravimetric Termal Analysis</i>
mm	millimeter, satuan panjang
μm	mikrometer, satuan panjang
Si	Silika
Al	Alumina
O	Oksigen
Fe	Besi
Na	Natrium, sodium
C	karbon
Mg	Magnesium
H ₂ O	hidroksida, air
CaO	Kalsium oxide
Mr	Massa molekul relatif,
ρ	Massa jenis
KN	Kilo Newton, satuan gaya
P	Beban maksimum
N	Newton, satuan gaya

L	Luas penampang
f'_c	Kuat tekan
A	Berat benda uji kering oven
B	Berat benda uji dalam kondisi SSD
C	Berat benda uji dalam air
SSD	Saturated Surface Dry
W1	Berat benda uji awal
W2	Berat benda uji setelah perendaman

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pemanasan Global telah menjadi masalah dunia saat ini. Kekhawatiran masyarakat terhadap pemanasan global akibat emisi gas rumah kaca (GRK) telah mendorong lahirnya *Kyoto Protocol* pada tahun 1997. Seiring dengan semakin besarnya kesadaran dunia terhadap ancaman gas rumah kaca kemudian melahirkan *Paris Agreement* pada Desember 2015 yang berisi kesepakatan dari negara anggota, yang pada intinya menyetujui ambang suhu berada di bawah 2°C.

Pada konferensi di Paris ini, Indonesia menyampaikan komitmen untuk menurunkan emisi GRK sebesar 29% di tahun 2030. Dari angka 29% tersebut, sektor energi mendapatkan porsi penurunan emisi GRK sebesar 314 juta ton CO₂. (Data Inventory Emisi GRK Sektor Energi, Kementerian ESDM, 2016).

Gas CO₂ merupakan salah satu gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global dan produksi semen turut memberi kontribusi sebesar 7% dari total emisi gas CO₂ yang ada di alam (Malhotra, 1999).

Peningkatan laju produksi semen akan menambah jumlah emisi gas CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer karena untuk memproduksi 1 ton semen akan mengakibatkan pelepasan sekitar 1 ton CO₂ (Davidovits, 1994).

Untuk mengurangi jumlah emisi CO₂ akibat industri semen, diupayakan material lain yang lebih ramah lingkungan, dan salah satu bahan yang dikembangkan yaitu geopolimer yang mempunyai fungsi sama seperti semen sebagai pengikat.

Penelitian-penelitian mengenai geopolimer telah banyak dilakukan, dan ditemukan bahwa emisi CO₂ dari produksi beton geopolimer lebih kecil 70-80% dibandingkan semen Portland biasa (Huseien dkk., 2017).

Hasil-hasil penelitian juga melaporkan bahwa produk geopolimer memiliki kekuatan dan ketahanan (durabilitas) yang lebih tinggi dibandingkan dengan produk konvensional yang memakai semen Portland biasa (Huseien dkk., 2017; Baszczyski dan Krol, 2017; Zhuang dkk., 2017; Colangelo dkk., 2017; Law dkk., 2015; Chindaprasirt dkk., 2018).

Geopolimer tersusun dari sintesa bahan-bahan alam non organik melalui proses polimerisasi. Bahan dasar pembuatan beton geopolimer adalah bahan-bahan yang banyak mengandung silika dan alumina yang diaktifkan dengan alkalin aktivator. Unsur-unsur ini banyak terdapat pada bahan-bahan pozolan, baik pozolan alam maupun buatan.

Salah satu pozolan buatan adalah *Fly ash* yang merupakan limbah hasil pembakaran batu bara, dapat dipakai sebagai bahan dasar (prekursor) dalam pembuatan geopolimer.

Sebagai prekursor, ketersediaan *fly ash* di Indonesia cukup banyak. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2018), pemanfaatan (konsumsi) batu bara dalam negeri selama kurun

waktu 5 tahun (2014-2018) sebesar 465 juta ton. Jika pemakaian 1 ton batu bara menghasilkan limbah *fly ash* sebanyak 0,15 – 0,17 ton (data PT. Petrokimia Gresik), maka dengan konsumsi batu bara sedemikian, akan menghasilkan limbah *fly ash* sebanyak \pm 70 juta ton. Kondisi ini menunjukkan perlunya upaya pengelolaan limbah batu bara secara lebih maksimal salah satunya dalam pembuatan geopolimer.

Selama ini *fly ash* selain digunakan sebagai bahan dalam industri semen, banyak juga dimanfaatkan sebagai bahan timbunan, tetapi jika penimbunannya dilakukan sembarangan, akan berpotensi mengancam kelestarian lingkungan. Hal ini karena ukuran partikelnya yang kecil sehingga mudah beterbangan di udara dan juga partikel-partikel logam berat yang dikandungnya mudah larut mencemari sumber-sumber air. Pemanfaatan *fly ash* dalam pembuatan geopolimer, dengan demikian mengurangi kerusakan lingkungan, serta menjadikan geopolimer sebagai material yang ramah lingkungan.

Selain pozolan buatan, pozolan alam dapat juga dimanfaatkan dalam pembuatan beton maupun mortar geopolimer karena mengandung senyawa silika dan alumina. Yang termasuk pozolan alam antara lain *diatomae* (hasil lapukan), batu rijang opalan dan serpih, tufa, abu vulkanik, batu apung (SNI 2460:2014 atau ASTM C618-08a). Di Indonesia, pozolan alam dikenal dengan nama trass.

Hasil penelitian yang menggunakan pozolan alam zeolite sebagai prekursor dalam pembuatan mortar geopolimer, memperlihatkan nilai

kekuatan tekan yang lebih rendah jika dibandingkan memakai prekursor lain seperti *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS). Hal ini dinyatakan oleh Degirmenci (2016) yang melakukan penelitian tentang pengaruh jenis prekursor terhadap kuat tekan mortar geopolimer. Tiga jenis prekursor digunakan yaitu *fly ash*, GGBFS dan natural zeolite. Hal yang sama juga terlihat ketika disubstitusi ke *fly ash* dan GGBFS sebesar 50% (50% *fly ash*: 50% zeolite dan 50% GGBFS : 50% zeolite). Kekuatan tekan mortar geopolimer berkurang ketika disubstitusi dengan zeolite. Hal ini disebabkan *pozzolanic activity* pada zeolite lebih rendah dibandingkan dengan *fly ash* dan GGBFS. *Pozzolanic activity* (aktivitas pozzolan) adalah ukuran derajat reaksi atau laju reaksi antara pozzolan dan Ca^{2+} atau kalsium hidroksida ($Ca(OH)_2$) dengan adanya air. Kondisi ini tergantung pada karakteristik intristik pozzolan seperti luas permukaan spesifik, komposisi kimia dan kandungan fase aktif (<https://en.m.wikipedia.org/wiki/Geopolymer>). Hasil serupa ditemukan oleh Risdanareni dkk (2015) yang melakukan penelitian terhadap beton geopolimer dengan menggunakan trass sebagai bahan pengisi. Alasan digunakannya trass sebagai bahan pengisi karena sifatnya yang kurang amorf. Hasil yang diperoleh menunjukkan pengaruh penambahan trass dalam campuran beton geopolimer menyebabkan kekuatan tekan berkurang hampir 36%.

Siswati dkk. (2018) meneliti tentang sifat amorfous dari bahan – bahan pozzolan yaitu trass, GGBFS, *fly ash* dan *silica fume*. Hasil penelitian

memperlihatkan adanya korelasi antara nilai amorf bahan pozzolan dengan nilai kekuatan tekan. Semakin besar nilai amorf, kekuatan tekan semakin besar dan sebaliknya. Hasil penelitian menunjukkan pozzolan alam trass memiliki nilai amorf yang sangat rendah atau bersifat kurang amorfous dibanding pozzolan lain. Menurut Haslinawati dkk, 2011, ikatan silica amorf mempunyai reaktifitas lebih tinggi dari ikatan Kristal. Hal ini disebabkan karena Kristal memiliki keteraturan susunan atom yang teratur berkala dengan pola tertentu sehingga memberikan ikatan yang lebih kuat antar atom dan antar molekul didalamnya. Sebaliknya amorf mempunyai susunan atom dengan pola tidak menentu, sehingga antar atom dan molekulnya mempunyai ikatan yang lemah. Untuk itu ikatan amorf yang besar akan memberikan kekuatan tekan yang besar dan begitupun sebaliknya. Berdasarkan hasil-hasil penelitian diatas, maka untuk pembuatan mortar geopolimer, trass kurang tepat dipakai sebagai bahan utama (precursor).

Dalam pembuatan beton maupun mortar, proporsi penggunaan agregat cukup besar yaitu sekitar 70 - 75% dari volume total campuran. Dengan semakin meningkatnya aktivitas konstruksi, kebutuhan pasir juga meningkat. Hal ini dapat menimbulkan degradasi lingkungan. Untuk itu perlu upaya untuk mengurangi pemakaian agregat halus pasir dengan mencari bahan pengganti sebagian (substitusi). Dengan mensubstitusi sebagian agregat halus diharapkan dapat menghemat cadangan pasir untuk kebutuhan di masa yang akan datang.

Trass merupakan salah satu bahan yang dapat dijadikan pengganti agregat halus. Selama ini trass banyak digunakan dalam pembuatan batako, bahan campuran pembuatan semen, bahan tambah dalam pembuatan beton, bahan substitusi untuk semen maupun juga agregat halus. Pemanfaatan trass dalam pembuatan mortar geopolimer juga terkait kandungan unsur silicanya yang tinggi, diharapkan dapat memberi dampak positif terhadap kinerja mortar geopolimer.

Selain itu, trass yang merupakan hasil pelapukan endapan vulkanik, cukup banyak ketersediaannya di Indonesia. Beberapa daerah yang memiliki kandungan Trass antara lain Nangroe Aceh Darussalam, Sumatra Utara, Sumatra Barat, Jambi, Bengkulu, Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Utara dan Sulawesi Selatan (Waani dan Lintong, 2017). Potensi trass yang besar ini dapat dimanfaatkan dalam pembuatan mortar geopolimer.

Alasan ini membuat penggunaan trass dalam penelitian ini dijadikan sebagai bahan substitusi agregat halus. Hal ini didukung oleh ACI 2001 (dalam Waani, 2017) yang menyatakan bahwa pada campuran dengan kadar agregat halus yang sedikit, terutama material yang lolos saringan No. 200, penggunaan material pozolan dengan gradasi lolos saringan No. 200 sebagai material tambahan, dapat mengurangi bleeding dan segregasi serta meningkatkan kekuatan beton melalui substitusi agregat halus.

Sifat penting dari material konstruksi adalah kekuatan dan durabilitasnya. Pada kondisi lingkungan yang ekstrim seperti yang banyak terjadi di daerah tropis, perubahan cuaca yang tiba-tiba, dari panas dan kemudian berubah menjadi lembab dapat menyebabkan penurunan kekuatan bahkan kerusakan dari suatu material konstruksi.

kekuatan tekan dan durabilitas mortar geopolimer berbahan fly ash dengan trass sebagai bahan substitusi pasir pada siklus basah kering menjadi menarik untuk diselidiki, dalam pengembangannya sebagai suatu material konstruksi.

B. Rumusan Masalah

Secara rinci masalah dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh substitusi trass pada agregat halus terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer berbahan *fly ash*?
2. Bagaimana durabilitas mortar geopolimer berbahan *fly ash* dengan substitusi trass pada agregat halus terhadap siklus basah kering?
3. Bagaimana hasil reaksi yang terbentuk dari campuran geopolimer berbahan *fly ash* dengan substitusi trass pada agregat halus ditinjau dari mikrostrukturnya?

C. Tujuan Penelitian

1. Menganalisis pengaruh substitusi trass pada agregat halus terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer berbahan *fly ash*.

2. Menganalisis durabilitas mortar geopolimer berbahan *fly ash* dengan substitusi trass pada agregat halus dalam larutan sodium sulfat dan air tawar dengan metode basah kering.
3. Menganalisis hubungan mikrostruktur dengan kekuatan tekan dan durabilitas dari mortar geopolimer berbahan *fly ash* dengan substitusi trass pada agregat halus.

D. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Hasil penelitian dapat memberi informasi tentang sifat dan pengaruh trass dalam campuran geopolimer *fly ash* serta menjadi bahan referensi guna pengembangan trass dalam fungsinya sebagai material konstruksi.
2. Hasil penelitian dapat memberi informasi tentang bagaimana kemampuan mortar geopolimer dalam menghadapi perubahan cuaca yang ekstrem sehingga hal ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangannya sebagai material konstruksi di negara yang beriklim tropis.
3. Hasil penelitian dapat digunakan sebagai bahan konstruksi alternatif yang lebih ramah lingkungan.
4. Turut mengambil bagian dalam usaha menurunkan emisi gas rumah kaca secara umum, dan khususnya turut andil dalam mencapai target penurunan emisi gas rumah kaca di Indonesia.

E. Batasan Masalah

Untuk kemudahan dan lebih terarahnya penelitian dan penulisan, maka permasalahan yang dibahas pada penelitian ini dibatasi pada :

1. Pembuatan dan pengujian kekuatan tekan dan durabilitas mortar geopolimer dilakukan di laboratorium.
2. Larutan aktivator yang digunakan berupa sodium hidroksida (NaOH) dan sodium silikat (Na_2SiO_3)
3. Variabel bebas yang diperhitungkan:

Pada tahap I :

- a. Molaritas NaOH : 8, 10, 12 Molar
- b. Rasio larutan aktivator yaitu Sodium Silikat dengan Sodium Hidroksida ($\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$) : 1,5; 2,0; 2,5
- c. Rasio larutan aktivator dengan *fly ash*: 0,4; 0,45; 0,5

Tahap I hanya dilakukan pada sampel dengan campuran dasar yaitu *fly ash*, larutan aktivator dan pasir (belum ada penambahan trass) dan hanya dilakukan pengujian kekuatan tekan pada umur 7 hari. Tujuan pada tahap I yaitu untuk menentukan nilai molaritas NaOH, $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dan rasio *activator/fly ash* yang memberikan hasil optimum ditinjau dari kekuatan tekan dan workabilitas, yang akan dijadikan acuan dalam pembuatan mortar geopolimer tahap II yang berbasis *fly ash* dengan trass sebagai bahan substitusi pasir.

Pada tahap II:

- a. Proporsi pasir (P) dan trass (T) sebagai agregat halus, dalam persen yaitu 100% P : 0% T, 90% P : 10% T, 80% P : 20% T, dan 70% P : 30% T, dengan campuran kontrol 100% P : 0% T
- b. Umur curing : 7, 28, 60 hari
- c. Uji durabilitas dilakukan dengan metode siklus basah kering sebanyak 5 (lima) siklus dalam larutan sodium sulfat (Na_2SO_4) dan air tawar. Proses pengujian mengacu pada SNI-03-0691-1996.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Hubungan Isu Lingkungan Dengan Produksi Beton

Berawal di Stockholm Swedia pada tahun 1972, masalah lingkungan hidup mulai disuarakan pada Konferensi Lingkungan global. Selanjutnya dalam KTT Bumi (*World Earth Summit*) pada tahun 1992 di Rio de Janeiro Brasil dengan isu gas rumah kaca, kemudian tahun 1997 di Jepang yang melahirkan *Kyoto Protocol* berupa kesepakatan yang harus dilakukan bersama yakni pengurangan emisi gas rumah kaca, efisiensi penggunaan energi dan material dasar alami, serta pemakaian material daur ulang dari limbah. Terakhir pada Konferensi Iklim di Paris tahun 2015, melahirkan *Paris Agreement* berisi kesepakatan dari negara anggota, yang pada intinya menyetujui ambang suhu berada di bawah 2°C.

Terkait dengan isu lingkungan, maka Neville, Davidovits dan Mehta melakukan kajian mengenai pengaruh penggunaan semen terhadap lingkungan dan menemukan beberapa kelemahan yakni:

- a. Kurang efisien dalam penggunaan bahan mentah, karena untuk membuat 1 ton klinker OPC dibutuhkan ± 1.7 ton bahan mentah.
- b. Kurang ramah lingkungan karena untuk memproduksi 1 ton klinker OPC mengeluarkan emisi CO₂ sebesar 1 ton.

- c. Rentan terhadap masalah durabilitas/ ketahanan karena hidrasi semen OPC menghasilkan mineral Ca(OH)_2 yang mudah terlarut
- d. Harga semen yang terus meningkat.

Penelitian-penelitian mengenai geopolimer menemukan bahwa emisi CO_2 dari produksi beton geopolimer lebih kecil 70-80% dibandingkan semen Portland biasa (OPC) (Huseien dkk., 2017).

B. Kajian Pustaka

1. Kuat tekan material geopolimer berbahan pozolan alam dan pozolan buatan

Penggunaan pozolan alami zeolite dan pozolan buatan *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* (GGBFS) sebagai prekursor dalam pembuatan mortar geopolimer, diteliti oleh Degirmenci (2016). Campuran mortar dibuat dengan konsentrasi NaOH 8, 10, 12 M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dari 1,0; 2,0 dan 3,0. Hasil yang diperoleh menunjukkan nilai kekuatan tekan mortar geopolimer yang menggunakan pozolan alami zeolite, lebih rendah dibandingkan memakai *fly ash* dan GGBFS. Penelitian dilanjutkan dengan mengkombinasi pozolan alami zeolite dengan *fly ash* sebesar 50% dan juga GGBFS sebesar 50% (50% *fly ash*: 50% zeolite dan 50% GGBFS : 50% zeolite). Hasil penelitian memperlihatkan kekuatan tekan mortar geopolimer berkurang ketika disubstitusi dengan zeolite jika dibandingkan dengan tanpa substitusi zeolite. Salah satu faktor yang

mempengaruhi hasil kekuatan tekan ini adalah *pozzolanic activity* yang rendah dari pozolan alam zeolite dibandingkan dengan *fly ash* dan GGBFS.

Risdanareni dkk., (2015) melakukan penelitian tentang pengaruh konsentrasi alkali activator terhadap perilaku mekanik beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dan trass. Alkali activator yang digunakan yaitu NaOH dengan molaritas 8 M dan 10 M serta rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; dan 2,5. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan beton geopolimer dipengaruhi oleh konsentrasi NaOH dan rasio activator. Untuk beton geopolimer yang dibuat dengan NaOH 8 M, kuat tekan tertinggi diperoleh pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,0 sementara yang dibuat dengan NaOH 10 M, kekuatan tekan tertinggi diperoleh pada rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5. Hasil penelitian ini juga menemukan pengaruh penambahan trass kedalam campuran beton geopolimer menyebabkan kekuatan tekan berkurang sampai hampir 36%.

Kemungkinan pemanfaatan pozolan alam tipe pumice sebagai precursor dalam pembuatan geopolimer semen dilakukan oleh Allahverdi dkk., (2008). Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pozolan alami tipe pumice dapat diaktifkan sebagai geopolimer dengan menggunakan campuran Na_2SiO_3 dan NaOH yang proporsional serta workabilitas dan kuat tekan 28 hari yang dapat diterima.

Ekaputri dan Triwulan (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh sodium sebagai aktivator dalam pembuatan beton geopolimer dengan memanfaatkan lumpur Sidoarjo dan trass sebagai bahan substitusi *fly ash*.

Campuran dibuat dengan konsentrasi NaOH 8 M sampai 14 M dengan interval 2 dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 0,5 sampai 2,5 dengan interval 0,5. Hasil penelitian menyatakan bahwa konsentrasi NaOH, perbandingan Na_2SiO_3 terhadap larutan NaOH dan bahan dasar (precursor) mempengaruhi kekuatan tekan beton. Hasil penelitian ini juga merekomendasikan bahwa trass dapat dipakai untuk beton struktural asalkan perbandingan berat $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ berkisar 2–2,5, dan konsentrasi larutan NaOH sebesar 10 M–14 M.

Najimi dkk., (2018) melakukan penelitian dengan mengkombinasikan natural pozzolan dan slag dalam pembuatan mortar geopolimer. Campuran dibuat dengan komposisi natural pozzolan/slag sebesar 70%:30%; 50%:50%; 30%:70%. Hasil studi memperlihatkan mortar dengan 70% slag kekuatannya lebih besar dibandingkan dengan 50% dan 30% slag. Hasil lain ditemukan bahwa reaktivitas slag lebih tinggi dibandingkan dengan natural pozzolan; kecepatan reaksi natural pozzolan meningkat dengan bertambahnya umur curing; kekuatan tekan meningkat dengan bertambahnya kandungan natural pozzolan dibandingkan yang rendah jumlah natural pozzolannya.

2. Durabilitas geopolimer berbahan berbahan pozzolan alam dan pozzolan buatan

Djobo dkk., (2016) melakukan penelitian untuk mempelajari kekuatan dan durabilitas mortar geopolimer berbahan pozzolan alam yang dibuat pada temperature 27°C dan 80°C. Pengujian durabilitas dilakukan dengan

dua metode yaitu metode *Wet-Dry Cycles* dalam air dan metode perendaman dalam H_2SO_4 . Pengujian sampel dengan metode *Wet-Dry Cycles* dilakukan dengan memanaskan dalam oven pada suhu $65^\circ C$ selama 24 jam, kemudian direndam dalam air pada temperatur ruang selama 24 jam. Ini dianggap 1 siklus. Pengujian dilakukan pada siklus ke 0, 5, 10, 15, 20, dan 25. Hasil penelitian menemukan bahwa pengurangan kekuatan setelah 25 siklus adalah sekitar 24% dan 14% untuk sampel yang dirawat pada temperatur $27^\circ C$ dan $80^\circ C$. Pengujian ketahanan dengan merendam mortar dalam 5% larutan asam sulfat selama 180 hari menunjukkan bahwa sampel yang dirawat pada temperatur $27^\circ C$ mengembangkan ketahanan terhadap asam yang lebih baik daripada sampel yang dirawat pada temperatur $80^\circ C$. Hal ini karena kehadiran gel yang kaya akan Na yang menetralkan asam sulfat (reaksi asam-basa) dalam sampel yang dirawat pada temperatur $27^\circ C$, dan kemudian mengurangi efek kerusakan pada struktur mortar sehingga meningkatkan ketahanan asamnya.

Kampala dkk., (2014) mempelajari durabilitas *Calcium Carbida Residual* (CCR) dan *fly ash* untuk stabilisasi tanah liat berlumpur terhadap *Wet-Dry Cycles* untuk memastikan kinerjanya dalam aplikasi perkerasan. Sampel direndam dalam air pada temperatur ruang selama 5 jam, kemudian dikeringkan dalam oven pada suhu $70^\circ C$ selama 48 jam dan dibiarkan pada temperatur ruang selama 3 jam. Proses ini dianggap 1 siklus. Sampel diuji pada beberapa siklus yaitu 1, 3 dan 6 siklus. Hasil

pengujian menunjukkan kekuatan berkurang secara signifikan dengan bertambahnya jumlah siklus.

Degirmenci (2017) melakukan penelitian tentang pengaruh rasio $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}$ terhadap durabilitas mortar geopolimer yang mengandung pozolan alam zeolite dan pozolan buatan *fly ash* dan GGBFS dalam larutan sodium sulfat dan magnesium sulfat serta asam sulfat dan asam klorida pada konsentrasi 5% dan 10% selama 24 minggu. Rasio $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 1; 2; 3 dan NaOH 10 M. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar rasio $\text{Na}_2\text{SO}_3/\text{NaOH}$ semakin meningkat kekuatan tekan sisanya. Tidak terdapat kerusakan berarti pada semua permukaan benda uji setelah terpapar 24 minggu dalam larutan sodium sulfat dan magnesium sulfat, demikian juga dalam larutan asam klorida. Sedikit kerusakan di permukaan dan di sekitar tepi benda uji terjadi pada benda uji yang direndam dalam larutan asam sulfat. Tingkat kerusakan permukaan meningkat dengan semakin meningkatnya konsentrasi asam sulfat. Mortar geopolimer berbahan natural pozolan mengalami kerusakan yang lebih besar dibandingkan GGBFS dan *fly ash*. Mortar berbasis GGBFS menunjukkan yang kinerja terbaik diikuti *fly ash* dalam ketahanan terhadap asam sulfat. Perubahan berat benda uji menunjukkan semakin besar rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$, semakin kecil perubahan berat mortar. Mortar berbasis natural pozolan mengalami perubahan berat paling besar sementara GGBFS yang paling kecil.

Long dkk (2017) mempelajari kemerosotan beton geopolimer berbahan fly ash yang direndam dalam larutan MgSO_4 5% yang menjalani 32 siklus pembasahan-pengeringan dan pemanasan-pendinginan dan hasilnya dibandingkan dengan beton semen Portland. Durasi satu siklus adalah 24 jam terbagi atas perendaman selama 14 jam dengan suhu 20°C , diikuti oleh 5 jam pengeringan dengan pemanasan 80°C , kemudian sampel disimpan selama 5 jam pada suhu 20°C . Hasil pengujian menjelaskan kehilangan kekuatan beton geopolimer lebih kecil dibandingkan beton semen Portland. Mekanisme deteriorisasi beton geopolimer terhadap larutan MgSO_4 ditemukan dimana gel natrium aluminium silikat hidrat (N-A-S-H) bereaksi dengan MgSO_4 , yang mengarah pada pembentukan magnesium aluminium silikat hidrat (M-A-S-H) gel yang memiliki kekuatan rendah.

Chotetanorm dkk (2013) mempelajari ketahanan mortar geopolimer berbahan *High-Calcium Bottom Ash* terhadap serangan sodium sulfat dengan variabel ukuran partikel bottom ash. Hasil menunjukkan kehalusan bottom ash meningkatkan kekuatan dan ketahanan terhadap serangan sulfat. Hal ini disebabkan oleh tingkat reaksi yang tinggi dari bottom ash yang halus dan jumlah pori dalam mortar yang lebih rendah.

Sata dkk (2012) mempelajari ketahanan mortar geopolimer *lignite bottom ash* terhadap serangan sulfat menemukan bahwa kehilangan berat mortar lebih kecil dibandingkan mortar semen portland. Mortar geopolimer menunjukkan kinerja lebih baik dalam larutan sulfat karena lebih stabilnya

cross-linked struktur geopolimer dibandingkan struktur hidrasi semen Portland.

3. Penggunaan bahan substitusi agregat dalam pembuatan geopolimer

Park dkk., (2016) mempelajari kemungkinan pemakaian limbah ban dalam bentuk remah karet (*crumb rubber*) sebagai pengganti sebagian pasir dalam pembuatan beton geopolimer berbahan dasar *fly ash*. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan tekan seperti molaritas NaOH (8 M dan 14 M, rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ (2 dan 0.5), Ukuran agregat kasar (9.5 mm dan 16 mm) , jumlah remah karet (5, 10, 15 dan 20% dari volume pasir), dan tipe *fly ash* berdasarkan persentase CaO diinvestigasi. Hasil uji menunjukkan kekuatan tekan beton geopolimer berkurang dengan meningkatnya jumlah *crumb rubber*.

Priyadharshini dkk., (2017) melakukan penelitian tentang pemakaian limbah tanah galian sebagai agregat halus dalam mortar geopolimer berbahan *fly ash*. Empat jenis agregat halus yang berbeda digunakan yaitu pasir sungai sebagai control, tanah plastisitas rendah, sedang dan tinggi. Hasil studi menunjukkan bahwa geopolimerisasi membantu memanfaatkan bahkan tanah plastisitas tinggi sebagai agregat halus. Mortar geopolimer berbasis tanah memiliki density yang lebih rendah dibandingkan geopolimer konvensional. Hasil uji juga memperlihatkan bahwa kekuatan dan penyusutan dari mortar geopolimer berbasis tanah sangat tergantung pada jenis tanah liat.

Mermerdas dkk., (2017) mempelajari pengaruh sifat agregat pada perilaku mekanik dan penyerapan dari mortar geopolimer berbahan *fly ash*. Digunakan tiga jenis agregat yaitu pasir sungai, *crushed limestone* dan kombinasi pasir dan *limestone*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mortar dengan agregat pasir sungai, kemampuan mengalirnya (*workabilitas*) lebih baik dari agregat yang lain. Kekuatan tertinggi ditunjukkan pada mortar yang menggunakan *crushed limestone*. Kombinasi pasir dan *limestone* memperlihatkan penyerapan dan sorptivitas paling rendah dibanding agregat lain.

Pengaruh substitusi agregat halus dengan *fly ash* kelas F terhadap ketahanan abrasi beton diteliti oleh Siddique (2003). Substitusi *fly ash* sebesar 10%, 20%, 30% dan 40% terhadap agregat halus. Hasil pengujian menunjukkan ketahanan terhadap abrasi dan kekuatan tekan beton meningkat dengan bertambahnya substitusi *fly ash* terhadap agregat halus.

4. Faktor-faktor yang mempengaruhi kekuatan dan durabilitas geopolimer

a. Jenis precursor.

Degirmenci (2016) melakukan penelitian tentang pengaruh jenis prekursor terhadap kekuatan tekan mortar geopolimer. Tiga jenis prekursor digunakan yaitu *fly ash*, *slag* dan *natural zeolite*. Hasilnya menunjukkan kekuatan tekan tertinggi dicapai oleh *slag* diikuti *fly ash* dan terendah adalah *natural zeolite*.

Dezfouli dan Rangaraju (2017) memeriksa kinerja geopolimer yang dibuat dari 3 prekursor yang berbeda yaitu *ground glass fiber*, *fly ash*, dan *glass-powder* yang terpapar pada larutan sodium sulfat (Na_2SO_4) 5% selama 120 hari. Geopolimer berbahan *ground glass fiber* dan *fly ash* menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan geopolimer berbahan *glass powder* ketika terpapar pada larutan sodium sulfat. Durabilitas *ground glass fiber* dan *fly ash* dapat dikaitkan dengan kestabilan gel alumino-silikat yang berkembang pada proses geopolimerisasi serta jumlah kalsium oksida yang rendah dalam sistem geopolimer

b. Kombinasi dan proporsi precursor.

Wardhono dkk., (2016) mempelajari efek penambahan *slag* sebesar 0, 10, 30 dan 50% terhadap kekuatan beton geopolimer *berbahan fly ash* kelas C yang dicuring pada temperatur normal. Penambahan 30% *slag* memberikan hasil kuat tekan tertinggi, meningkatkan *workability* dan *setting time*.

Elyamany (2018) Mempelajari *setting time* dan sifat mortar geopolimer pada umur 7 hari dengan menggunakan parameter seperti temperatur *curing*, molaritas NaOH, rasio larutan alkalin dengan binder serta tipe binder. Tiga tipe prekursor yaitu *Fly ash* (FA), GGBFS dan *silica fume* dengan variasi 100%FA, 50%FA + 50% GGBFS, 50%FA + 35% GGBFS + 15% *Silica fume*. Temperatur curing 30°C, 60°C, 90°C. 4 konsentrasi NaOH yaitu 10 M, 12 M, 14 M, 16 M. Empat rasio alkalin aktivator dengan binder yaitu 0.35, 0.40, 0.45, 0.50. Rasio Na_2SiO_3 dan NaOH= 2, rasio pasir dan

binder = 3. Hasil menunjukkan tipe binder yang menghasilkan pengaruh signifikan pada sifat mortar geopolimer adalah campuran yang mengandung 50%FA, 35%GGBFS, 15% *silica fume*.

c. Tipe activator.

Nadoushan dan Ramezaniapour (2016) Melakukan pengujian tentang pengaruh tipe aktivator NaOH dan KOH terhadap kekuatan tekan pasta geopolimer dengan bahan *slag* dan *natural pozolan pumice*. Hasil menunjukkan activator KOH memberi kekuatan tekan yang lebih tinggi dibanding NaOH pada konsentrasi aktivator 6-8 molar.

Penelitian tentang penggunaan kombinasi activator dalam pembuatan geopolimer berbahan *fly ash* dilakukan Palomo dkk. Mereka memakai kombinasi dari Sodium hidroksida (NaOH) dengan sodium silikat (Na_2SiO_3) dan potasium hidroksida (KOH) dengan potasium silikat (K_2SiO_3) sebagai larutan alkali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tipe larutan alkali adalah faktor yang sangat penting yang mempengaruhi kekuatan mekanis geopolimer. Kombinasi dari sodium hidroksida dengan sodium silikat memberikan kekuatan tekan yang paling tinggi.

d. Molaritas NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$.

Pengaruh molaritas aktivator dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ terhadap sifat mekanik beton geopolimer berbahan *fly ash* dengan trass sebagai pengisi dipelajari oleh Risdanareni dkk., (2014). Variasi molaritas NaOH yang digunakan adalah 8M dan 10M, serta rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ ialah 0,5; 1,0;

1,5; 2,0; 2,5. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan tekan tertinggi dicapai pada molaritas NaOH 10 M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5.

Ekaputri dkk., (2013) melakukan penelitian dengan memanfaatkan trass dan lumpur Sidoarjo sebagai material substitusi *fly ash* dalam pembuatan beton geopolimer. NaOH yang digunakan bervariasi dari 8 sampai 14 M (interval 2), dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dari 0,5 sampai 2,5 (interval 0,5). Hasil penelitian menunjukkan bahwa trass dapat dipakai untuk beton struktural jika molaritas NaOH 10 – 14 M dan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ berkisar 2 – 2,5.

Agrawal dkk., (2017) melakukan penelitian untuk mengoptimasi jumlah NaOH dan Na_2SiO_3 dalam mempersiapkan pembuatan pasir geopolimer *fly ash*. Variasi NaOH dari 6, 8, 10, 12 M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ dari 0,5 sampai 2,5 (interval 0,5). Hasil menunjukkan kekuatan tekan maksimum tercapai pada kondisi NaOH 10 M dan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ adalah 2.

Rattanasak dan Chindaprasirt (2009) mempelajari pengaruh molaritas NaOH dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ pada geopolimer berbasis *fly ash* kelas C. Perbandingan Na_2SiO_3 dengan NaOH = 0.5; 1.0; 1.5; dan 2.0. Molaritas NaOH yang digunakan 5, 10 dan 15 M. Perbandingan pasir dengan FA = 2.75 dimana sampel dicuring oven selama 48 jam pada suhu 65°C. Hasil yang diperoleh menunjukkan kekuatan tekan mortar hingga 70 MPa pada molaritas NaOH 10 M dan perbandingan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 1,0

Abdullah dkk., (2011) mempelajari pengaruh molaritas NaOH dan $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ terhadap kekuatan tekan pasta geopolimer berbahan *fly*

ash menyatakan bahwa konsentrasi NaOH 12 molar dan rasio 2,5 menghasilkan kekuatan tekan tertinggi.

Degirmenci (2016) menyimpulkan bahwa konsentrasi NaOH 12 M dan rasio sodium silikat terhadap sodium hidroksida sebesar 3 memberikan kekuatan tekan yang tertinggi pada mortar geopolimer dengan berbagai tipe binder yaitu pozolan alam zeolite, *fly ash* dan GGBFS.

Hasil penelitian Sathonsaowaphak dkk., (2009) menunjukkan kekuatan yang relatif tinggi dengan menggunakan konsentrasi NaOH 12.5 M dengan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 1.50.

Rattanasak dan Chindaprasirt (2009) mempelajari pengaruh NaOH dalam pembentukan geopolimer berbahan *fly ash*. Leaching SiO_2 dan Al_2O_3 dilakukan dengan mencampurkan *fly ash* dengan larutan NaOH untuk interval waktu yang berbeda dan leaching dianalisis dalam hal kandungan silika dan alumina. Dipelajari juga pengaruh metode pencampuran terpisah dan pencampuran normal. Untuk pencampuran terpisah, larutan NaOH dicampur dengan *fly ash* selama 10 menit pertama; kemudian larutan natrium silikat ditambahkan ke dalam campuran. Untuk pencampuran normal, *fly ash*, sodium hidroksida dan larutan sodium silikat dimasukkan dan dicampur secara bersamaan. Geopolimer dicuring pada temperature 65°C selama 48 jam. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kelarutan *fly ash* tergantung pada konsentrasi NaOH dan lama waktu pencampuran dengan NaOH. Untuk prosedur pencampuran, pencampuran

terpisah memberi kekuatan mortar sedikit lebih baik daripada pencampuran normal.

e. Metode *curing*.

Metode perawatan (*curing*) merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi sifat bahan geopolimer.

Nurrudin dkk., (2018) membuat review tentang metode *curing* dalam pembuatan beton geopolimer. Hasil review menunjukkan metode *curing* memberikan pengaruh yang baik pada kekuatan beton geopolimer. *Curing* secara konvensional pada temperatur ambient menunjukkan pengembangan kekuatan yang rendah pada umur muda, sementara *curing* pada temperatur lebih tinggi, menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan.

Hasil pengujian Chindaprasirt dkk., 2010 menyatakan bahwa temperatur optimum untuk perawatan bahan geopolimer berkisar 60 -75°C. Hal ini dinyatakan juga oleh Demie dkk., (2011) and Reddy, dkk., (2012) bahwa kekuatan tertinggi tertinggi dicapai ketika temperatur curing 60-70°C. *Curing* pada temperatur yang lebih tinggi sekitar 80-90°C, menyebabkan kekuatan tekan menurun.

Chindaprasirt dkk., (2017) mempelajari pengaruh curing 35°C selama 3 hari sebagai representasi temperatur ambient pada cuaca panas dari mortar geopolimer *fly ash* kelas C. *Curing* oven 65°C selama 1 hari dan *curing* temperatur ruang 25°C selama 7 hari dilakukan sebagai pembandingan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *curing* panas

meningkatkan hasil geopolimerisasi dalam pembentukan jaringan Si-O-Al. Curing 35°C dan 65°C memastikan pembentukan *calcium silicate hydrate* (C-S-H) dan *alumino-silicate* (ikatan geopolimer).

Krishnan dkk., (2014) mempelajari pengaruh curing temperatur ambient (tanpa curing dalam air) pada beton geopolimer *fly ash* dengan penambahan GGBFS sebesar 10%, 20%, 30% dan 40% dari berat *fly ash*. Aktivator yang digunakan berupa NaOH sebesar 12 M dan rasio $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ sebesar 2,5. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa metode curing pada temperatur ambient dapat meningkatkan kekuatan tekan beton geopolimer sebesar 80,50 N/mm² pada perbandingan *fly ash* 60% dan GGBFS 40%.

Penelitian tentang beton geopolimer yang dicuring pada temperatur ruang dilakukan oleh Wardhono dkk., (2016) dengan fokus pada pengaruh penambahan *slag* pada pengembangan kekuatan beton geopolimer yang menggunakan *fly ash* kelas C. Proporsi *fly ash* dan *slag* adalah 1 FA:0 SL, 0,9 FA: 0,1 SL, 0,7 FA:0,3 SL, dan 0,5 FA:0,5 SL. Hasil penelitian menunjukkan bahwa curing temperature ruang pada 30% penambahan *slag* menghasilkan kekuatan tekan tertinggi dan nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal.

Hossain (2003) dalam Ekaputri (2013) menyarankan penggunaan suhu tinggi pada curing beton berbahan material vulkanik untuk meningkatkan reaksi pozolaniknya.

Wallah (2014) melaporkan hasil studi tentang pengaruh perawatan dan umur terhadap kekuatan tekan beton geopolimer berbasis *fly ash*. Tiga jenis *curing* diterapkan pada beton geopolimer yaitu *curing* pada temperatur ruang, *curing oven* 60°C selama 24 jam dan kombinasi *curing oven* dan *curing* dalam air. Hasil yang diperoleh menunjukkan beton yang dirawat pada temperatur ruang mengalami perkembangan kekuatan yang lebih lambat terutama pada umur muda sampai dengan 3 bulan dan setelah 3 bulan tidak terjadi peningkatan kekuatan tekan yang berarti, sedangkan beton yang dilakukan perawatan dalam oven menunjukkan bahwa kekuatan tekan beton yang diharapkan, dapat tercapai setelah proses *curing* selesai dan tidak terjadi peningkatan kekuatan tekan yang berarti setelah proses *curing oven* selesai. Hal yang sama terjadi pada beton yang dilakukan kombinasi *curing*.

f. Temperatur *curing* dan durasi *curing*.

Bakria dkk., (2011) mempelajari perbedaan temperatur *curing* pada kekuatan tekan geopolimer. Sampel dicuring pada temperatur ruang dan temperatur 50°C, 60°C, 70°C, 80°C. Kekuatan tekan tertinggi dicapai pada temperatur 60°C.

Nurruddin dkk., (2018) melaporkan bahwa durasi *curing* meningkatkan mekanisme geopolimerisasi dan menghasilkan kekuatan yang lebih besar. Namun durasi *curing oven* yang lebih lama, menghasilkan kerusakan pada sampel.

Abdullah dkk., (2011) mempelajari pengaruh temperatur *curing* terhadap kekuatan tekan pasta geopolimer berbahan *fly ash* menyatakan

bahwa suhu 60°C menghasilkan kekuatan tekan tertinggi sebesar 70 MPa. Priyadharshini dkk., (2017) mempelajari pengaruh suhu *curing* terhadap geopolimer mortar yang menggunakan 3 tipe tanah plastis (*low, medium, high plastic soil*). Geopolimer mortar dicuring oven pada suhu 60-90°C selama 24 jam. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan suhu *curing* dari 60°C-90°C juga meningkatkan kekuatan tekan geopolimer mortar.

Ilkentapar dkk., (2017) mempelajari pengaruh durasi *curing* oven pada kekuatan mortar geopolimer berbasis *fly ash*. Sampel dioven pada suhu 75°C, selama 4 jam, 1, 2, 3, dan 7 hari. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan kekuatan tekan yang signifikan dari *curing* panas selama 4 jam hingga 7 hari, dimana kekuatan tekan setelah *heat curing* 4 jam yaitu 4.41 MPa, *heat curing* 1 hari 33,84 MPa, *heat curing* 2 hari 50.50, *heat curing* 3 hari 63.32 MPa, dan *heat curing* 7 hari 73.57 MPa.

Hasil penelitian Görhan dan Kürklü (2014) menyimpulkan bahwa suhu *curing* dan waktu *curing* memiliki pengaruh pada sifat fisik dari geopolimer mortar.

Swanepoel dan Strydom (2002) meneliti mortar yang dicuring pada suhu 40, 50, 60, dan 70°C selama 6, 24, 48, dan 72 jam. Hasil yang diperoleh yaitu, kondisi optimum terdapat pada sampel yang dicuring pada suhu 60°C selama 48 jam.

g. Rasio larutan aktivator terhadap binder.

Ridtirud dkk., (2100) mempelajari pengaruh rasio activator/*fly ash* terhadap penyusutan mortar geopolimer. Rasio activator/*fly ash* sebesar

0.4, 0.5, 0.6 dan 0.7 diuji. Hasil Pengujian menunjukkan kekuatan tekan berkurang sedangkan penyusutan mortar meningkat dengan makin besarnya rasio activator/*fly ash*.

Aliabdo dkk., (2016) mempelajari pengaruh rasio activator terhadap binder dalam membuat beton geopolimer. Hasil menunjukkan kekuatan tekan optimum diperoleh pada nilai rasio 0,4.

Abdullah dkk., (2011) mempelajari pengaruh rasio larutan activator /*fly ash* terhadap kekuatan tekan. Rasio activator/*fly ash* sebesar 0.4, 0.5 dan 0.6. Hasil menunjukkan kuat tekan tertinggi dari pasta geopolimer berbahan *fly ash* tercapai pada rasio larutan aktivator terhadap fly ash sebesar 0.5.

h. Penambahan air.

Aliabdo dkk., (2016) mempelajari pengaruh penambahan air terhadap beton geopolimer. Hasil menunjukkan semakin banyak air yang ditambahkan semakin meningkatkan workabilitas campuran, namun mengurangi sifat-sifat lain dari beton geopolimer. Tambahan air optimum sebesar 30 kg/m³ memberi sedikit pengaruh pada sifat geopolimer.

Sathonsaowaphak dkk., (2009) mempelajari efek penambahan air pada sifat workabilitas dan kekuatan mortar *lignite bottom ash*. Ditemukan bahwa peningkatan volume air juga meningkatkan workabilitas mortar geopolimer, hal ini lebih efektif dibandingkan penggunaan *naphthalene* berbasis superplasticizer dengan sedikit penurunan kekuatan yang serupa.

I. Penambahan semen.

Mehta dan Siddique (2017) melakukan evaluasi sifat beton geopolimer berbasis *fly ash* rendah kalsium dimana *fly ash*nya sebagian diganti (0, 10, 20 dan 30%) dengan semen Portland biasa. Komposisi optimum beton geopolimer tercapai pada prosentase 20% semen portland

Pengaruh penambahan semen Portland pada beton geopolimer berbasis *fly ash* terhadap sifat workabilitas, kekuatan tekan, kekuatan tarik, modulus elastisitas, penyerapan dan *gravimetric termal analysis* (TGA) dilakukan Aliabdo dkk. (2016). Hasil studi menunjukkan penambahan semen meningkatkan semua geopolimer berbasis *fly ash* kecuali sifat workabilitas.

Phoo-ngernkham (2013) mempelajari pengaruh penambahan semen portland pada sifat pasta geopolymer berbahan *fly ash* kalsium tinggi meliputi *setting time*, kekuatan tekan, porositas dan penyerapan air, tegangan-regangan, modulus elastisitas, analisis SEM. Hasil menunjukkan penggunaan OPC dalam mengganti sebagian *fly ash* mengurangi *setting time*, porositas dan kapasitas regangan, sedangkan kekuatan tekan dan modulus elastisitas meningkat.

Tanakorn Phoo-ngernkham, (2015) Mempelajari perilaku mortar geopolymer berbahan *fly ash* kalsium tinggi dan semen portland terhadap kekuatan tekan, modulus *rupture* dan *fracture* dengan variasi konsentrasi NaOH. Hasil menunjukkan pemakaian semen portland meningkatkan kekuatan tekan, modulus *rupture* dan karakteristik *fracture* serta konsentrasi

NaOH juga berpengaruh signifikan terhadap sifat ini. Pemakaian 10% semen dengan 14 M NaOH memberikan hasil yang optimum.

Mahya Askarian (2018) Mempelajari pengembangan beton geopolimer berbahan *fly ash* dan *GGBS* serta penambahan OPC, yang dicuring pada temperatur ambient dengan menggunakan potassium karbonat sebagai aktivator. Variasi OPC dari 10%-60% dari total binder. Hasil menunjukkan pengaruh OPC dalam campuran geopolimer adalah mengurangi workabilitas, *setting time* tapi memberi pengaruh signifikan pada kekuatan tekan karena reaksi cepat dari OPC dengan alkali aktifator.

j. Kehalusan binder.

Sata dkk., (2012) meneliti tentang pengaruh kehalusan *lignite bottom ash* terhadap kekuatan tekan dan durabilitas mortar geopolimer dalam asam sulfat 3% dan larutan natrium sulfat 5%. Tiga kehalusan *lignite bottom ash* yaitu, halus, sedang dan kasar digunakan untuk membuat mortar geopolimer. Ditemukan bahwa *lignite bottom ash* yang halus lebih reaktif dan memberi mortar geopolimer kekuatan tekan lebih tinggi dibandingkan dengan *lignite bottom ash* kasar. Semua mortar geopolimer *lignite bottom ash* lebih tahan terhadap serangan natrium sulfat dan asam sulfat dibandingkan mortar semen portland.

Sathonsaowaphak dkk., (2009) mempelajari pengaruh kehalusan *lignite bottom ash* dalam pembuatan mortar geopolymer. Diperoleh hasil kekuatan yang relatif tinggi yaitu 24,0-58,0 MPa diperoleh dengan

menggunakan *ground bottom ash* dengan 3% tertahan pada saringan no. 325 dan ukuran partikel rata-rata dari 15.7 μm .

k. Kandungan kalsium.

Phoo-ngernkham dkk., (2015) meneliti menggunakan *fly ash* tinggi kalsium (tipe C) dengan penambahan semen Portland sebagai bahan perbaikan beton semen portland. Material yang digunakan yaitu *high calcium FA*, NaOH 6, 10 dan 14 M, dan 0%, 5%, 10%, dan 15% semen Portland. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan geopolimer mortar memberikan ikatan geser dan ikatan lentur yang cukup tinggi dibandingkan dengan penggunaan pengikat perbaikan komersial, sehingga hal ini menunjukkan bahwa produk tersebut dapat digunakan sebagai produk alternatif untuk perbaikan beton.

Mehta dan Siddique (2017) meneliti ketahanan beton geopolimer berbasis *fly ash* yang diberi tambahan kalsium berupa Ordinal Portland Cement (OPC). Hasilnya menunjukkan bahwa ditambahkannya OPC sebagai pengganti *fly ash* meningkatkan kekuatan tekan beton geopolimer berbasis *fly ash* secara signifikan namun tidak sama halnya terhadap sulfat.

C. Landasan Teori

1. Teori geopolimer

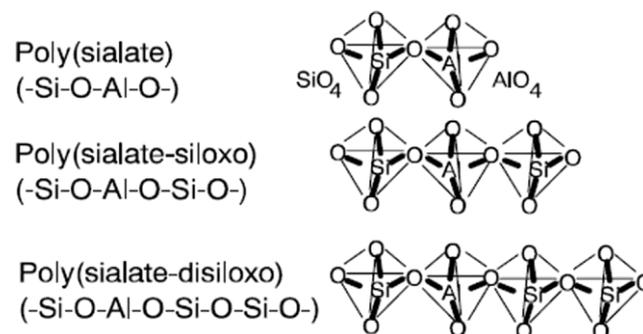
Istilah geopolimer diperkenalkan pertama kali oleh Profesor Davidovits pada tahun 1978 untuk menggambarkan jenis pengikat yang memiliki

komposisi kimia menyerupai zeolite tetapi memiliki mikrostruktur yang amorf. Davidovits menganjurkan penggunaan istilah '*poly(sialate)*' untuk geopolimer berbasis silica-aluminat. *Sialate* adalah kependekan dari silicon-okso-aluminat (*silico-oxo-aluminate*).

Rumus empiris dari *poly(sialate)* ditunjukkan pada Persamaan 1 :



Dimana "z" adalah bilangan 1, 2, atau 3; M adalah kation alkali seperti kalium atau natrium, dan "n" adalah derajat polimerisasi (Torgal dkk., 2008). *Polysialate* dibedakan menjadi tiga tipe yaitu tipe *poly(sialate)* (-Si-O-Al-O-), tipe *poly(sialate siloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O-) dan tipe *poly(sialate-disiloxo)* (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-). Struktur dari *polysialate* ini dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Tipe struktur dari *polisialate* (Suwan T. 2016)

Reaksi kimia yang terjadi pada proses polimerisasi terbagi dalam 3 tahap (Aliabdo dkk., 2016b) yaitu:

- Disolusi atom Si dan Al dari sumber material prekursor disebabkan oleh ion hidroksida

Alkali aktivator merupakan senyawa yang digunakan agar terjadi reaksi polimerisasi pada geopolimer. Penggunaan alkali aktivator dalam pembuatan geopolimer memiliki peranan yang sangat penting sebagai bahan pengikat unsur aluminium dan unsur silikat yang terkandung dalam precursor. Alkali activator umumnya berbasis sodium atau kalium. Ion hidroksida yang terdapat pada alkali activator akan bereaksi dengan unsur silica dan aluminium pada material precursor dan membentuk ikatan polimer dengan mengeluarkan air (H_2O) sebagai sisa proses polimerisasi.

Glukhovsky (1980) dalam Adam (2009) mengklasifikasikan alkali aktivator dalam enam group berdasarkan komposisi kimianya dimana M adalah ion alkali:

- a. *Caustic alkalis*: MOH
- b. *Non-silicate weak acid salts*: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- c. *Silicates*: $M_2O.nSiO_2$
- d. *Aluminates*: $M_2O.nAl_2O_3$
- e. *Alumino-silicates*: $M_2O.nAl_2O_3.(2-6)SiO_2$
- f. *Non-silicate strong acid salts*: M_2SO_4

3. Kelebihan dan kekurangan geopolimer

Penelitian-penelitian terdahulu melaporkan bahwa produk geopolimer memiliki kekuatan awal yang tinggi, penyusutan (*shrinkage*) yang rendah, *freeze-thaw resistance*, ketahanan terhadap sulfat, ketahanan terhadap korosi, ketahanan terhadap asam, ketahanan terhadap api dan reaksi agregat alkali yang tidak berbahaya. Mereka menemukan bahwa

geopolimer lebih *durable* dibandingkan dengan semen Portland (Huseien dkk., 2017). Davidovits melaporkan bahwa semen geopolimer dapat mengeras dengan cepat pada temperatur ruang dan memiliki kekuatan tekan sekitar 20 MPa hanya setelah 4 jam pada temperatur 20°C dan sekitar 70 – 100 Mpa setelah 28 hari.

Baszczyski dan Krol., (2017) membandingkan ketahanan dua jenis pengikat yaitu semen dan geopolimer yang terpapar pada suhu yang tinggi (100-800°C) dan lingkungan korosi dalam bentuk larutan natrium klorida dan kalsium klorida. Bahan geopolimer mengalami penurunan kekuatan 45% pada suhu 800°C, jauh lebih baik daripada mortar semen. Selain itu bahan geopolimer tidak menunjukkan penyusutan seperti campuran semen Portland. Perilaku thermal mortar geopolimer berbahan *fly ash* juga dievaluasi oleh Colangelo dkk., (2017). Mortar dipanaskan dalam oven pada 5 variasi suhu yaitu 150, 250, 350, 450 dan 550°C selama 30 menit dan kemudian dikeluarkan untuk didinginkan selama 5 menit. Siklus ini diulang 8 kali untuk mencapai total 4 jam. Hasil tes menunjukkan mortar geopolimer stabil.

Ketahanan mortar geopolimer terhadap serangan asam sulfat dan sodium klorida dipelajari oleh Zhuang dkk., (2017). Mereka menemukan bahwa mortar geopolimer memiliki ketahanan yang baik terhadap asam sulfat dan sodium klorida.

Law dkk., (2015) melaporkan sekumpulan pengujian yang menganalisa tentang kekuatan dan sifat durabilitas dari beton geopolimer. Tes durabilitas

menunjukkan bahwa beton geopolimer dengan modulus activator (M_s) 1.0 dan 1.25, dibandingkan dengan semen portland memberikan parameter durabilitas yang sama kekuatannya.

Chindaprasirt dkk., (2018) mempelajari ketahanan terhadap api dari bata geopolymer berbahan *fly ash* kalsium tinggi yang dicuring di luar ruangan (*outdoor heat exposure*). Hasil pengujian memperlihatkan kehilangan berat yang kecil setelah dipapar oleh api.

Kekurangan-kekurangan geopolimer dalam pembuatan beton menurut Djuwantoro Hardjito adalah pembuatannya sedikit lebih rumit karena jumlah material yang digunakan lebih banyak dibandingkan dengan beton konvensional serta belum adanya perhitungan mix disain yang pasti.

D. Material Penyusun Mortar Geopolymer

1. *Fly ash*

Fly ash merupakan material limbah hasil sampingan (*by-product*) proses pembakaran batu bara. Material *fly ash* dikategorikan dalam material "*pozzolon*" yakni material *siliceous* atau *aluminous* yang didalamnya terdapat sedikit sekali atau tidak sama sekali material *cementious* sebagaimana yang dimiliki semen portland. Material *fly ash* dapat bereaksi secara kimia dengan cairan alkali pada temperatur tertentu untuk membentuk binder yang memiliki sifat seperti semen. Sebagian besar partikel *fly ash* mempunyai diameter 1-150 mikrometer yang lolos dari ayakan 45 mikrometer.

Umumnya *fly ash* memiliki komposisi kimia utama berupa *silica* (SiO_2), *alumina* (Al_2O_3) dan *ferric oxide* (Fe_2O_3). Kandungan kimia lainnya seperti *calcium oxide* (CaO), *magnesium* (MgO), *sulphur* (SO_3), *alkaline* (Na_2O , K_2O), *phosphorus* (P_2O_5), *manganese* (Mn_2O_3) dan *titanium* (TiO_2). ASTM C 618-19 membagi pozzolan dalam tiga kategori yaitu kelas N, F dan kelas C seperti pada Tabel 1. Minimum kandungan senyawa SiO_2 , Al_2O_3 dan Fe_2O_3 adalah 70% untuk kelas N, sedangkan kelas C dan F adalah 50%.

Tabel 1. Persyaratan kandungan kimia Pozzolan (ASTM C 618-19)

Kebutuhan	Kelas		
	N	F	C
<i>Silicon dioxide</i> (SiO_2) plus <i>aluminium oxide</i> (Al_2O_3) plus <i>iron oxide</i> (Fe_2O_3), min, %	70	50	50
<i>Calcium Oxide</i> (CaO), %	<i>Report only</i>	18 max	>18
<i>Sulfur trioxide</i> (SO_3), maks, %	4.0	5.0	5.0
<i>Moisture</i> , maks, %	3.0	3.0	3.0
<i>Loss on ignition</i> (LOI), maks, %	10.0	6.0	6.0

Fly ash kelas F dihasilkan dari batu bara jenis antrasit atau bituminous, tetapi juga dapat dihasilkan dari batubara subbituminus dan dari lignit. Fly ash kelas C biasanya dihasilkan dari pembakaran batu bara lignit atau subbituminus, dan dapat juga dihasilkan dari batu bara orbituminus antrasit. Fly ash kelas C memiliki kadar kapur (CaO) yang tinggi. Menurut ASTM C 618-19, *fly ash* dikelompokkan kelas C jika kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $\geq 50\%$ dan kadar $\text{CaO} > 18\%$ dan kelas F jika kadar ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) $\geq 50\%$ dan kadar $\text{CaO} \leq 18\%$.

2. Trass

Trass adalah pozolan alam yang berasal dari hasil pelapukan mineral endapan vulkanik. Pada umumnya pozolan alam mengandung unsur silica, alumina dan oksida besi yang jika bereaksi dengan kalsium hidroksida dan alkali akan membentuk suatu komponen yang pembentukannya tergantung pada *pozzolanic activity* dari material pozolan. Besarnya *pozzolanic activity* pada material pozolan ditentukan oleh besarnya kandungan *amorphous silica glass*. Selain itu ditentukan juga oleh *specific surface area*, komposisi kimia dan minerologi. Pozolan alam hanya mengandung sedikit *amorphous silica glass* tetapi banyak mengandung *crystal silica* berupa mineral yang sedikit atau bahkan tidak dapat bereaksi dengan kalsium (Waani dan Lintong, 2017).

Dalam pembuatan semen, trass merupakan salah satu bahan aditif yang digunakan. Trass dalam keadaan sendiri tidak mempunyai sifat mengeras, tetapi apabila direaksikan dengan kapur padam dan air dengan perbandingan tertentu akan menghasilkan senyawa kalsium silikat hidrat yang mempunyai sifat semen dan tidak larut dalam air. Trass juga lebih mudah bereaksi dengan air karena bersifat porous dan setelah mengeras, tak tembus air (Nindita D, 2008).

Di Indonesia, ketersediaan kandungan trass cukup banyak yang tersebar mengikuti jalur rangkaian gunung api tersier dan kuarter antara lain terdapat di Nangroe Aceh Darussalam, Sumatra Utara, Sumatra Barat, Jambi, Bengkulu, Lampung, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Bali,

Nusa Tenggara Barat, Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Utara dan Sulawesi Selatan (Waani dan Lintong, 2017). Selama ini, trass banyak digunakan dalam pembuatan batako, bahan campuran pembuatan semen, bahan tambah dalam pembuatan beton, bahan substitusi untuk semen maupun agregat halus, dan lain sebagainya.

3. Agregat halus

Agregat halus adalah agregat yang semua butirannya menembus saringan 4.80 mm (SII.0052-1980) atau 4.75 mm (ASTM C33-1982) atau 5.00 mm (BS.812-1976). Agregat halus dapat berupa pasir alami sebagai hasil disintegrasi alami batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu (SNI 03-2847-2013).

4. Alkali aktivator

Alkali aktivator merupakan senyawa yang digunakan agar terjadi reaksi polimerisasi pada mortar geopolimer. Pada umumnya alkali activator berbasis sodium (NaOH) atau potasium (KOH). Tetapi banyak penelitian, menambahkan sodium silica (Na_2SiO_3) atau potasium silica (K_2SiO_3) dalam alkali activator.

Pemilihan alkali aktivator didasarkan hasil penelitian dari Palomo dkk. (1999) yang menyatakan bahwa kombinasi dari sodium hidroksida (NaOH) dengan sodium silikat (Na_2SiO_3) memberikan kekuatan tekan yang paling tinggi dibandingkan dengan kombinasi dari potasium hidroksida dengan potasium silikat.

Banyak penelitian juga menemukan bahwa pemakaian sodium silikat atau sodium silikat dicampur dengan sodium hidroksida, memberikan kuat tekan terbaik (Adam, 2009)

Adapun tujuan penambahan sodium silica yaitu untuk meningkatkan pembentukan precursor geopolimer atau proses polimerisasi (Hardjito dkk., 2008). Sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur aluminium dan silika yang terkandung dalam bahan dasar (precursor) sedangkan sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat.

Sodium hidroksida pada umumnya berbentuk padatan sehingga harus dilarutkan terlebih dahulu. Untuk membuat larutan NaOH, perlu ditentukan molaritas yang akan digunakan.

Dalam ilmu kimia, molaritas (disingkat M) merupakan ukuran konsentrasi larutan. Molaritas suatu larutan menyatakan jumlah mol suatu zat terlarut dalam satu liter larutan.

Rumus molaritas dapat dilihat pada persamaan 3, 4 dan 5.

$$\text{Molaritas} = \frac{\text{Jumlah mol terlarut}}{\text{Volume larutan dalam air}} \quad (3)$$

Jika yang diketahui bukan mol melainkan gram zat terlarut, dapat digunakan rumus berikut :

$$M = \frac{\text{gram (terlarut)}}{M_r} \times \frac{1000}{\text{mL (larutan)}} \quad (4)$$

Jika yang diketahui massa jenis larutan dan kadar/persen massa (%), maka digunakan rumus:

$$M = \frac{\text{mol zat terlarut}}{\text{Volume}} = \frac{\text{gram} \cdot 1000}{\text{Mr} \cdot \text{Volume}} = \frac{\% \cdot \rho \cdot 10}{\text{Volume}} \quad (5)$$

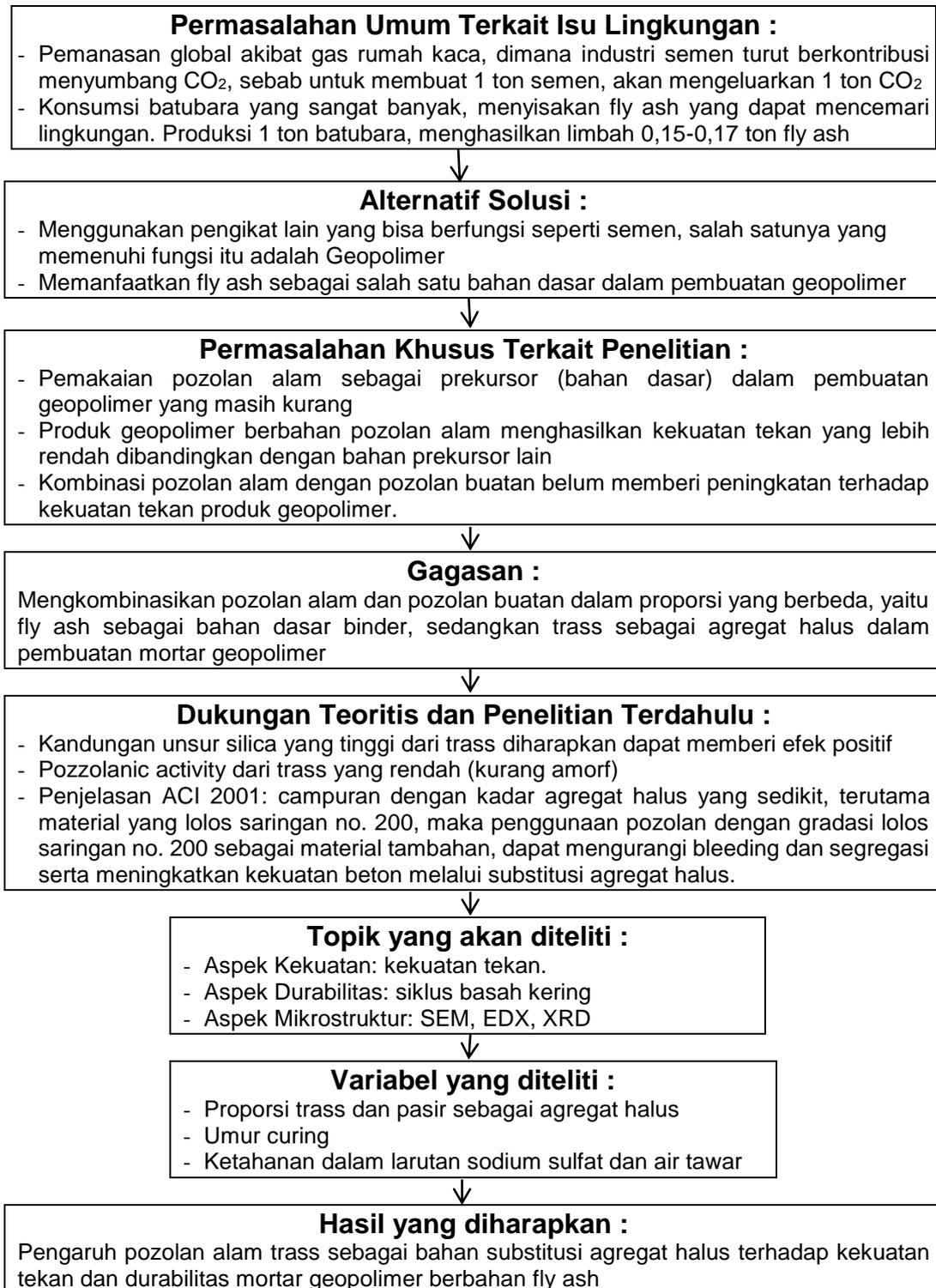
Keterangan:

M = Molaritas

Mr = Massa Molekul Relatif

ρ = Massa Jenis

E. Kerangka Pikir Penelitian



Gambar 2. Kerangka Pikir Penelitian