

SKRIPSI

**PERILAKU TEKAN BETON *GEOPOLYMER* BERBAHAN
DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK
PET**

*Compressive Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with
The Addition of PET Plastic Fibers*

Disusun dan diajukan oleh:

**ANDI MUHAMMAD SARJAN RAMADHAN
D011 20 1098**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

SKRIPSI

**PERILAKU TEKAN BETON *GEOPOLYMER* BERBAHAN
DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK
PET**

*Compressive Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with
The Addition of PET Plastic Fibers*

Disusun dan diajukan oleh:

**ANDI MUHAMMAD SARJAN RAMADHAN
D011 20 1098**



**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA
2024**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PERILAKU TEKAN BETON *GEOPOLYMER* BERBAHAN DASAR
FLY ASH DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET**

Disusun dan diajukan oleh

**ANDI MUHAMMAD SARJAN RAMADHAN
D011 20 1098**

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 24 Juli 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.
NIP: 197206192000122001

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Andi Muhammad Sarjan Ramadhan

NIM : D011201098

Program Studi : Teknik Sipil

Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

{ PERILAKU TEKAN BETON *GEOPOLYMER* BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET }

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, 31 JULY 2024

Yang Menyatakan



Andi Muhammad Sarjan Ramadhan

ABSTRAK

ANDI MUHAMMAD SARJAN RAMADHAN. *Perilaku Tekan Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Penambahan Serat Plastik PET* (dibimbing oleh **Rita Irmawaty**)

Kebutuhan material untuk konstruksi terus meningkat seiring dengan perkembangan zaman. Beton memiliki peranan yang penting dalam pembangunan infrastruktur. Namun, akhir-akhir ini sering kali mendapat kritik oleh pemerhati kelestarian lingkungan yang disebabkan oleh emisi gas karbon dioksida (CO₂) pada saat produksi semen yang berdampak pada penipisan lapisan ozon hingga pemanasan global. Selain itu juga, jumlah limbah industri dan organik terus meningkat dari tahun ke tahun. Kurangnya upaya dalam proses pendauran ulang limbah menjadi material yang bernilai menjadi fokus utama dalam menuju Indonesia Emas 2045. Pada penelitian ini, beton *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* dikombinasikan dengan *rice husk ash* sebesar 5% yang divariasikan dengan serat plastik PET untuk komposisi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75%, kemudian dilakukan evaluasi terhadap perilaku tekan, modulus elastisitas, dan pola retak. Benda uji berbentuk silinder berdimensi diameter 100 mm dan tinggi 200 mm akan diuji pada umur 7 dan 28 hari setelah *moist curing*. Hasil uji tekan diperoleh bahwa penambahan PET menurunkan nilai kuat tekan rata-rata 24.22% untuk setiap penambahan 0.25% PET pada komposisi 0.25% dan 0.5%, namun terjadi peningkatan sebesar 10.91% pada komposisi 0.75% terhadap 0.5%. Selanjutnya, analisa perhitungan nilai modulus elastisitas menjelaskan bahwa persamaan secara teori dengan persamaan $E_{(1a)} = 4700\sqrt{f'c}$ dan $E_{(1b)} = w_c^{1.5} \times 0.043\sqrt{f'c}$ dari ACI 318M – 19 memberikan hasil yang mendekati dengan persamaan eksperimental $E_{(2b)} = 1.486 (\rho c)^2 (f'c)^{1/3} \times 10^{-3}$ dari Noguchi dkk. (2009). Adapun pola retak untuk variasi PET 0% dan 0.25% dominan pola retak geser dan/atau kerucut, sedangkan pada PET 0.5% dan 0.75% dominan pola retak kolom.

Kata Kunci: Beton *geopolymer*, serat plastik PET, *fly ash*, dan kuat tekan

ABSTRACT

ANDI MUHAMMAD SARJAN RAMADHAN. *Compressive Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with The Addition of PET Plastic Fibers* (supervised by **Rita Irmawaty**)

The demand for materials for construction continues to increase along with developments over time. Concrete has an important role in infrastructure development. However, recently environmental conservation observers have often received criticism due to carbon dioxide (CO₂) gas emissions during cement production which has an impact on ozone layer depletion and global warming. Apart from that, the amount of industrial and organic waste continues to increase from year to year. The lack of effort in the process of recycling waste into valuable materials is the main focus towards a Golden Indonesia 2045. In this research, geopolymer concrete made from fly ash is combined with 5% rice husk ash which is varied with PET plastic fiber for a composition of 0%, 0.25 %, 0.5%, and 0.75%, then evaluation of the compressive behavior, modulus of elasticity, and crack patterns was carried out. The specimens were cylindrical in shape with dimensions of the diameter 100 mm and height 200 mm that were tested at 7 and 28 days after moist curing. The compression test results showed that the addition of PET reduced the compressive strength value by an average of 24.22% for each addition of 0.25% PET at compositions of 0.25% and 0.5%, but there was an increase of 10.91% for compositions of 0.75% versus 0.5%. Furthermore, analysis of the calculation of the elastic modulus value explains that the theoretical equation with the equations $E_{(1a)} = 4700\sqrt{f'c}$ and $E_{(1b)} = w_c^{1.5} \times 0.043\sqrt{f'c}$ from ACI 318M – 19 gives results which is close to the experimental equation $E_{(2b)} = 1.486 (\rho c)^2 (f'c)^{1/3} \times 10^{-3}$ from Noguchi et al. (2009). The crack patterns for the 0% and 0.25% PET variations are predominantly shear and/or conical crack patterns, while for 0.5% and 0.75% PET the columnar crack patterns are dominant.

Keywords: Geopolymer concrete, PET plastic fibers, and compressive strength

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xiv
KATA PENGANTAR	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Batasan Masalah.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Penelitian Terdahulu	7
2.2 Beton <i>Geopolymer</i>	15
2.3 Material Penyusun Beton <i>Geopolymer</i>	17
2.3.1 <i>Fly Ash</i>	17
2.3.2 <i>Rice Husk Ash</i>	19
2.3.3 Alkali Aktivator	20
2.3.4 Agregat Halus	21
2.3.5 Agregat Kasar	22
2.3.6 Bahan Tambah (<i>Admixtures</i>)	25
2.3.7 Serat Plastik PET	26
2.4 Pemeriksaan Karakteristik Agregat.....	27
2.5 Pengujian Mikrostruktur	28
2.5.1 XRF (<i>X-ray Fluorescence</i>)	28
2.5.2 SEM (<i>Scanning Electron Miscroscopy</i>)	28
2.6 <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	29
2.7 Densitas	31
2.8 Kuat Tekan.....	31
2.9 Modulus Elastisitas	33
2.10 Pola Retak	36
2.11 Implementasi Beton <i>Geopolymer</i>	37
BAB III METODE PENELITIAN.....	39
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	39
3.2 Tahapan Penelitian	39
3.3 Jenis Penelitian dan Sumber Data	41
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	41
3.5 Pemeriksaan Karakteristik Agregat.....	43
3.5.1 Agregat Halus	43

3.5.2 Agregat Kasar	44
3.6 Pemeriksaan Mikrostruktur	44
3.7 Komposisi Campuran Beton <i>Geopolymer (Mix Design)</i>	44
3.8 Standar Pengujian Beton Segar	45
3.9 Pembuatan Benda Uji	46
3.10 Perawatan Benda Uji	48
3.11 Pengujian Benda Uji	49
3.11.1 <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	49
3.11.2 Densitas	50
3.11.3 Kuat Tekan	50
3.11.4 Modulus Elastisitas	51
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	53
4.1 Pemeriksaan Karakteristik Agregat	53
4.1.1 Agregat Halus	53
4.1.2 Agregat Kasar	54
4.2 Pengujian Mikrostruktur	56
4.2.1 <i>Fly Ash</i>	56
4.2.2 <i>Rice Husk Ash</i>	58
4.3 Nilai <i>Slump</i>	60
4.4 Pengujian Densitas	61
4.5 Pengujian Kuat Tekan	61
4.6 Titik Luluh (<i>Yield Point</i>)	64
4.6.1 Variasi PET 0%	65
4.6.2 Variasi PET 0.25%	66
4.6.3 Variasi PET 0.5%	67
4.6.4 Variasi PET 0.75%	68
4.7 Modulus Elastisitas	71
4.8 Pola Keruntuhan Beton Silinder	73
4.8.1 Variasi PET 0%	73
4.8.2 Pola Retak untuk Variasi PET 0.25%	74
4.8.3 Pola Retak untuk Variasi PET 0.5%	75
4.8.4 Pola Retak untuk Variasi PET 0.75%	76
4.9 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)</i>	77
4.10 Korelasi Variasi Serat Plastik PET dengan Kuat Tekan	79
4.11 Korelasi Kuat Tekan terhadap Nilai <i>Slump</i>	80
4.12 Korelasi <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> dengan Kuat Tekan	81
4.13 Korelasi Kuat Tekan terhadap Waktu	81
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	84
5.1 Kesimpulan	84
5.2 Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	85

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Hubungan antara molaritas dan kuat tekan beton <i>geopolymer</i> kombinasi <i>fly ash</i> tipe f dan slag 1:1, 100% slag, dan 100% <i>fly ash</i> tipe f.....	8
Gambar 2 Hubungan kuat tekan penggunaan <i>fly ash</i> dan slag 1:1 dengan variasi alkali aktivator	8
Gambar 3 Pengaruh metode <i>curing</i> terhadap kuat tekan beton <i>geopolymer</i> dengan penggunaan <i>fly ash</i> dan slag 1:1	9
Gambar 4 Perbedaan harga beton <i>geopolymer</i> dengan kombinasi pemakaian slag dan <i>fly ash</i> 1:1, 100% slag, 100% <i>fly ash</i> terhadap beton normal.....	9
Gambar 5 Contoh benda uji silinder beton <i>geopolymer</i> 10/20	10
Gambar 6 Perbandingan nilai modulus elastisitas mutu	14
Gambar 7 Konsep dasar produksi beton <i>geopolymer</i>	16
Gambar 8 Polimerisasi beton <i>geopolymer</i>	16
Gambar 9 Struktur RHA yang dilihat dari mikroskop	19
Gambar 10 Skematik pengujian UPV	30
Gambar 11 Pengujian kuat tekan beton	32
Gambar 12 Kurva metode <i>general yield moment</i>	36
Gambar 13 Jenis-jenis pola retak benda uji silinder	36
Gambar 14 Diagram alir penelitian.....	39
Gambar 15 Material beton <i>geopolymer</i>	42
Gambar 16 <i>Moist curing</i> benda uji.....	49
Gambar 17 Set pengujian <i>ultrasonic pulse velocity</i> (UPV)	50
Gambar 18 Pengujian kuat tekan dan modulus elastisitas	52
Gambar 19 Hasil gradasi agregat halus (pasir)	54
Gambar 20 Hasil gradasi agregat kasar (batu pecah)	56
Gambar 21 Visualisasi dan persebaran unsur kimia <i>fly ash</i>	56
Gambar 22 Hasil pemeriksaan XRF besaran senyawa dari <i>fly ash</i>	58
Gambar 23 Visualisasi dan persebaran unsur kimia <i>rice husk ash</i>	54
Gambar 24 Hasil pemeriksaan XRF besaran senyawa dari <i>rice husk ash</i>	55
Gambar 25 Nilai <i>slump</i> tiap variasi persentase pet	60
Gambar 26 Hasil analisa densitas beton umur 7 dan 28 hari	61
Gambar 27 Kuat tekan rata-rata di umur 7 dan 28 hari	63
Gambar 28 Variasi SN umur 7 hari.....	65
Gambar 29 Variasi SN umur 28 hari	66
Gambar 30 Variasi SA umur 7 hari.....	66
Gambar 31 Variasi SA umur 28 hari.....	67
Gambar 32 Variasi SB umur 7 hari.....	67
Gambar 33 Variasi SB umur 28 hari.....	68
Gambar 34 Variasi SC umur 7 hari.....	68
Gambar 35 Variasi SC umur 28 hari.....	69
Gambar 36 Kuat tekan rata-rata maksimum umur 28 hari.....	70
Gambar 37 Perbandingan nilai modulus elastisitas rata-rata	72
Gambar 38 Pola retak sampel SN umur 7 hari.....	73
Gambar 39 Pola retak sampel SN umur 28 hari.....	73

Gambar 40 Pola retak sampel SA umur 7 hari	74
Gambar 41 Pola retak sampel SA umur 28 hari.....	74
Gambar 42 Pola retak sampel SB umur 7 hari.....	75
Gambar 43 Pola retak sampel SB umur 28 hari.....	75
Gambar 44 Pola retak sampel SC umur 7 hari.....	76
Gambar 45 Pola retak sampel SC umur 28 hari	76
Gambar 46 Hasil uji <i>ultrasonic pulse velocity</i>	78
Gambar 47 Korelasi variasi serat plastik PET dengan kuat tekan	79
Gambar 48 Korelasi kuat tekan terhadap nilai <i>slump</i>	80
Gambar 49 Korelasi <i>ultrasonic pulse velocity</i> dengan kuat tekan	81
Gambar 50 Korelasi kuat tekan terhadap waktu	83

DAFTAR TABEL

Tabel 1	Rekapitulasi hasil uji XRF <i>fly ash</i> dan <i>rice husk ash</i>	10
Tabel 2	Rancangan jumlah pembuatan benda uji	13
Tabel 3	Rekapitulasi UPV dan kuat tekan beton	15
Tabel 4	Komposisi unsur senyawa kimia <i>fly ash</i>	18
Tabel 5	Persentase lolos agregat halus pada ayakan	22
Tabel 6	Pembagian gradasi agregat kasar	24
Tabel 7	Klasifikasi beton berdasarkan kecepatan gelombang UPV	30
Tabel 8	<i>Correlation factor</i> untuk k_1	34
Tabel 9	<i>Correlation factor</i> untuk k_2	35
Tabel 10	Standar pemeriksaan karakteristik agregat halus	43
Tabel 11	Standar pemeriksaan karakteristik agregat kasar	44
Tabel 12	Standar pemeriksaan mikrostruktur <i>fly ash</i> dan <i>rice husk ash</i>	44
Tabel 13	<i>Mix design</i> beton <i>geopolymer</i> (kg/m^3)	45
Tabel 14	Variasi benda uji	47
Tabel 15	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat halus (pasir)	53
Tabel 16	Hasil pemeriksaan karakteristik agregat kasar (batu pecah).....	54
Tabel 17	Hasil pemeriksaan tipe kelas <i>fly ash</i>	57
Tabel 18	Hasil pengujian <i>slump</i>	60
Tabel 19	Rekapitulasi hasil pengujian kuat tekan.....	62
Tabel 20	Rekapitulasi perbandingan nilai modulus elastisitas	71
Tabel 21	Nilai ultrasonic pulse velocity (UPV).....	77
Tabel 22	Kuat tekan dan waktu yang diperlukan.....	82

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
d	Diameter benda uji (mm)
t	Tinggi benda uji (mm)
cm	Sentimeter
d	Tebal Benda Uji (mm)
SN	Sampel beton silinder <i>Geopolymer</i> PET 0%
SA	Sampel beton silinder <i>Geopolymer</i> PET 0.25%
SB	Sampel beton silinder <i>Geopolymer</i> PET 0.5%
SC	Sampel beton silinder <i>Geopolymer</i> PET 0.75%
E	Modulus Elastisitas Persamaan ASTM C96 – 02 (N/mm ²)
E _(1a)	Modulus Elastisitas Persamaan ACI 318M – 19 (N/mm ²)
E _(1b)	Modulus Elastisitas Persamaan ACI 318M – 19 (N/mm ²)
E _(2a)	Modulus Elastisitas Persamaan Noguchi dkk. (2009) (N/mm ²)
E _(2b)	Modulus Elastisitas Persamaan Noguchi dkk. (2009) (N/mm ²)
Kg	Kilogram
ltr	Liter
w _c	Berat volume beton (kg/m ³)
L	Panjang Bentang (mm)
m	Jarak antara pusat permukaan transduser (m)
ρ _c	Densitas beton (kg/m ³)
mm	Milimeter
MPa	Satuan Mega Pascal
M	Berat beton (kg)

N	Newton
NaOH	Sodium hidroksida
Na ₂ SiO ₃	Sodium Silikat
P	Beban Maksimum Total (kN)
PET	<i>Poly Ethylene Terephthalate</i>
RHA	<i>Rice Husk Ash</i>
f _c	Kuat tekan (N/mm ²)
s	Detik
SNI	Standar Nasional Indonesia
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
T	Waktu tempuh, (s)
UPV	<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>
TTM	<i>Tokyo Testing Machine</i>
v	Kecepatan rambat gelombang, (m/s)
V	Volume wadah ukur (m ³)
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i>
S ₂	Tegangan pada 40% tegangan runtuh (N/mm ²)
S ₁	Tegangan pada saat regangan 0.000050 (N/mm ²)
ε ₂	Regangan pada saat S ₂ (0.000050)
k ₁	<i>Correlation factor 1</i> modulus elastisitas
k ₂	<i>Correlation factor 2</i> modulus elastisitas
M	Molaritas

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Persiapan material.....	90
Lampiran 2 Pengujian karakteristik material	90
Lampiran 3 Pengecoran beton <i>geopolymer</i>	91
Lampiran 4 Proses <i>moist curing</i> beton <i>geopolymer</i>	91
Lampiran 5 Pengujian kuat tekan beton.....	92

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa, atas segala kebaikan dan karunia-Nya kepada setiap insan intelektual, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini. Tak lupa sholawat serta salam kepada baginda Rasulullah Muhammad SAW sebaik-baiknya suri tauladan. Penyusunan tugas akhir yang berjudul “**PERILAKU TEKAN BETON *GEOPOLYMER* BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET**” merupakan salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa terselesaikannya Tugas Akhir ini tidak hanya dari penulis sendiri melainkan berkat ilmu, arahan, bimbingan serta bantuan dari berbagi pihak. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada :

1. **Bapak Prof. Dr. Eng. Ir. H. Muhammad Isran Ramli, S.T., M.T.,IPM** selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. **Bapak Prof. Dr. H. M. Wihardi Tjaronge S.T., M.Eng.,** selaku Ketua Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. **Bapak Dr. Eng. Bambang Bakri, ST., MT.** selaku Sekretaris Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
4. **Prof Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, S.T., M.T.** selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan serta kesabarannya dalam menghadapi kualitas keilmuan penulis dari awal penelitian hingga selesainya tugas akhir ini. Semoga kebaikan, kesehatan serta kemudahan senantiasa dilimpahkan kepada beliau.
5. **Bapak Prof. Dr. Ir. Rudy Djamaluddin, S.T., M.Eng.,** selaku Kepala Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
6. Seluruh dosen Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

7. Seluruh staf dan karyawan Departemen Teknik Sipil, staf dan karyawan Fakultas Teknik serta staf Laboratorium dan asisten Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.

Yang istimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **H. Andi Muhammad Tahir M.** dan ibunda **Hj. Andi Wahyuni** atas semua kasih sayang yang begitu tulus dan doa yang tiada henti serta nasehat-nasehat yang selalu melekat pada penulis disetiap waktu.
2. Rekan-rekan di **Laboratorium Riset Perkuatan Struktur** yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
3. Rekan-rekan laboran dan asisten **Laboratorium Struktur dan Bahan** yang senantiasa membantu selama proses penelitian tugas akhir penulis.
4. **Nur Kholish Kirman** sebagai teman seperjuangan sedari awal kuliah yang selalu menghibur, memberikan wejangan dan ajakan selama masa perkuliahan.
5. **Muhammd Farhan Anhar** dan **Al Muktasim Billah** sebagai teman bertukar pikiran sedari awal perkuliahan.
6. **Dhafiyah S. Khansa** selaku rekan tugas akhir yang senantiasa memberikan masukan dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir.
7. Saudara-saudari **ENTITAS 2021**, teman-teman Departemen Teknik Sipil dan Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin **Angkatan 2020** yang senantiasa memberikan warna serta pengalaman yang sangat berharga selama masa perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari pembaca sangat penulis harapkan demi kesempurnaan Tugas Akhir ini.

Akhirnya semoga Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa melimpahkan kebaikan dan karunia-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini, beton dikenal sebagai bahan konstruksi yang sangat umum digunakan, terbentuk dari campuran utama batuan (agregat), air, dan semen portland, yang secara umum dikenal sebagai beton konvensional. Beton memiliki peran utama yang telah digunakan secara meluas dalam pembangunan infrastruktur, termasuk gedung, jembatan, jalan raya, dan pondasi. Dilihat dari segi jumlahnya, beton menjadi bahan paling banyak dimanfaatkan oleh manusia setelah air. Menurut Kementerian PUPR (2013), lebih dari 60% proyek konstruksi di Indonesia menggunakan beton, mulai dari pembangunan yang paling sederhana hingga proyek yang kompleks dan rumit, beton menjadi kebutuhan yang tidak terelakkan. Konsumsi beton secara global mencapai sekitar 8,8 juta ton setiap tahun, dan kebutuhan akan bahan ini terus berkembang seiring dengan peningkatan kebutuhan akan fasilitas dasar manusia. Namun, akhir-akhir ini, beton yang kita kenal selama ini sering kali mendapat kritik terutama oleh pemerhati kelestarian lingkungan hidup. Hal pertama yang sering dijadikan sasaran perhatian adalah emisi gas karbon dioksida (CO_2) yang dihasilkan pada proses produksi semen. Gas tersebut dilepaskan ke atmosfer secara bebas dan berakibat pada kerusakan lingkungan hidup, seperti penipisan lapisan ozon hingga pemanasan global.

Untuk mengurangi dampak negatif yang merusak lingkungan tersebut dengan tetap memperhatikan ketahanan material beton, diperlukan penggunaan material lain sebagai alternatif pengganti Semen Portland dalam proses pembuatan beton. Prof. Joseph Davidovits memperkenalkan *geopolymer* sebagai inovasinya, yang merujuk pada sintesis bahan-bahan alam non-organik melalui proses polimerisasi. Bahan dasar utama yang dibutuhkan untuk menciptakan material *geopolymer* ini adalah substansi yang kaya akan silika dan alumina. Unsur-unsur ini dapat ditemukan dalam bahan hasil samping industri, seperti *fly ash* yang berasal dari residu pembakaran batu bara.

Material *fly ash* yang digunakan dalam produksi beton memiliki potensi untuk mengalami reaksi kimia dengan larutan alkali pada suhu tertentu, membentuk pasta

yang memiliki karakteristik mirip semen. Pasta ini kemudian dicampur dengan agregat, menghasilkan beton *geopolymer* tanpa memerlukan penggunaan semen lagi. Penelitian terkait pengganti material semen terhadap *fly ash* telah banyak dilakukan oleh peneliti-peneliti terdahulu seperti yang dilakukan oleh Kosim dkk. (2021), Singh dkk. (2021), Modesta dkk. (2019), dan Shah, D Dhruvin dkk. (2020). Sebenarnya ada juga material lain yang biasa digunakan sebagai pengganti semen selain *fly ash*, tetapi mengingat Indonesia salah satu pengguna terbesar batu bara yang tentunya memiliki limbah *fly ash* yang membuka peluang untuk dimanfaatkan kembali.

Menurut Singh dkk. (2021), penelitian beton *geopolymer* yang menggunakan komposisi *fly ash* dengan variasi 100%, 90%, 80%, dan 60%, serta larutan alkali aktivator NaOH dan Na₂SiO₃. Sampel beton yang telah dicetak diberikan perlakuan *oven-dry curing*. Data spesifik terkait penelitian ini memberikan hasil pada pengujian di hari ke-28, komposisi *fly ash* 100% yang memiliki kuat tekan tertinggi yakni sebesar 30,79 MPa. Adapun yang terendah terdapat pada komposisi *fly ash* 60% yakni sebesar 22,57 MPa.

Riswati dkk. (2017) telah melakukan sebuah penelitian eksperimental yang mengarah pada pemanfaatan limbah, seperti *fly ash* sebagai bahan dasar produk *geopolymer*. Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh perbandingan *fly ash* dan abu sekam padi terhadap struktur mikro dan sifat mekanik beton *geopolymer* setelah perendaman air laut. Ada lima perbandingan bahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi yakni FA : ASP sebesar (85:15)%; (80:20)%; (75:25)%; (70:30)%; dan (65:35)%. Kedua bahan dasar tersebut disintesis dengan menggunakan larutan alkali aktivator (NaOH + H₂O + Na₂SiO₃) dengan perbandingan larutan alkali dan bahan dasar yang digunakan yaitu 1 : 2,5. Hasil pengujian kuat tekan beton *geopolymer* diperoleh untuk variasi FA : ASP tersebut berturut-turut sebesar 45.76 MPa, 58.89 MPa, 51.72 MPa, 49.84 MPa, dan 35.55 MPa. Semua variasi perbandingan bahan dasar *fly ash* dan abu sekam padi yang digunakan pada penelitian ini memenuhi syarat untuk beton bawah laut. Nilai kuat tekan yang diperoleh jauh lebih besar dari syarat kuat tekan beton yang dipengaruhi oleh lingkungan yang mengandung sulfat. Penggunaan beton yang berorientasi pada ramah lingkungan memberikan banyak opsi untuk memanfaatkan limbah. Salah satu

yang dapat diaplikasikan sebagai bahan tambah pada beton ialah limbah plastik. Limbah ini menjadi masalah serius yang sedang dihadapi saat ini karena sulit terurai bakteri ditambah lagi penggunaannya yang sangat luas. Perlu diketahui bahwa Indonesia menjadi penyumbang sampah plastik kedua terbesar di dunia. Oleh karena itu, penambahan plastik dalam bentuk serat pada bahan utama penyusun beton dapat meningkatkan kuat tarik pada beton.

Modesta dkk. (2019) melakukan sebuah penelitian dengan menambahkan serat plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) berukuran 1 – 3 mm dengan panjang 2,5 cm pada benda uji silinder tinggi 20 cm dan diameter 10 cm. Variasi persentase serat yang ditambahkan pada campuran beton adalah 0%, 0,25%, 0,5, dan 1%. Berdasarkan hasil pengujian di laboratorium yang dilakukan pada hari ke-7, 14, dan 28, beton dengan tambahan serat plastik PET memiliki nilai kuat tekan dan kuat tarik belah yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal. Nilai kuat tekan dan kuat tarik beton paling tinggi adalah penambahan serat plastik PET sebanyak 0,5%. Pada hari ke-28, beton dengan tambahan PET 0,5% meningkatkan kuat tekan sebesar 11,667% dan secara signifikan meningkatkan nilai kuat tarik belah sebesar 25,507% dari beton normal.

Penelitian lain juga dilakukan oleh Kosim dkk. (2021), titik puncak yang diperoleh pada pengujian kuat tekan rata-rata variasi beton campuran limbah *cup* plastik berada pada variasi 0,5%, dimana nilai kuat tekan rata-rata beton normal sebesar 24,04 MPa dan nilai kuat tekan rata-rata beton campuran limbah *cup* plastik 0,5% sebesar 24,20 MPa, besarnya peningkatan yang terjadi sebesar 0,16% atau sebanyak 0,16 MPa.

Adapun penelitian serupa dilakukan oleh Shah, D Dhruvin dkk. (2020) tentang studi eksperimental beton *geopolymer* menggunakan serat plastik PET dengan variasi penambahan 0,25% dan 0,5% terhadap berat betonnya. Serat PET ini diperoleh dari sisa-sisa botol plastik yang tidak terpakai. Peneliti membuat 30 benda uji dengan 3 jenis sampel, yakni 9 benda uji kubus tanpa adanya PET, 3 benda uji kubus dengan penambahan PET sebesar 0,25% dari berat betonnya, dan 6 benda uji kubus dengan penambahan PET 0,5% dari berat betonnya, 6 benda uji silinder tanpa adanya serat PET, dan 6 benda uji silinder dengan penambahan PET 0,25%. Adapun benda uji kubus untuk kuat tekan dan silinder untuk kuat tarik belah. Hasil

pengujian di umur 7 hari menunjukkan kuat tekan untuk 0,5% PET meningkat sebesar 7,3%, 0,25% PET meningkat sebesar 9,03%, dan di umur 28 hari 0,25% PET meningkat sebesar 12,7%. Serta di umur 7 hari untuk kuat tarik belah 0,25% PET meningkat sebesar 6,08%, dan di umur 28 hari 0,25% PET meningkat sebesar 9,56%.

Merujuk beberapa hasil penelitian yang menunjukkan potensi pemanfaatan material *fly ash* dan penambahan serat plastik PET pada beton *geopolymer* memberikan tren positif dalam mengurai kembali limbah pembuangan batu bara yang masih menjadi senjata pamungkas Indonesia sebagai pembangkit listrik dan juga penggunaan plastik Indonesia yang memberikan gelar penyumbang terbesar kedua di dunia, selain itu memberikan juga tren kenaikan kuat tekan apabila penambahan serat plastik PET dengan kadar yang optimum.

Berdasarkan latar belakang tersebut maka penting untuk dilakukan penelitian yang bersifat eksperimental terkait bagaimana perilaku tekan material *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET sebagai bahan tambah beton *geopolymer* penulis tuangkan dalam penelitian yang berjudul **“PERILAKU TEKAN BETON GEOPOLYMER BERBAHAN DASAR FLY ASH DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET”**

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian pada latar belakang maka dapat dibuat rumusan masalah sebagai berikut:

1. Berapa nilai kuat tekan beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET ?
2. Bagaimana korelasi antara nilai kuat tekan beton *geopolymer* terhadap variasi serat plastik PET ?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan Rumusan Masalah di atas maka tujuan penelitian ini adalah:

1. Untuk mengevaluasi nilai kuat tekan beton *geopolymer* yang terbuat dari *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) dengan variasi serat plastik PET.

2. Untuk mengevaluasi korelasi antara nilai kuat tekan beton *geopolymer* terhadap variasi serat plastik PET.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini antara lain sebagai berikut:

1. Mengetahui manfaat penggunaan *fly ash* yang dihasilkan melalui limbah pembakaran batu bara yang bisa dijadikan sebagai bahan alternatif pencampuran beton *geopolymer*.
2. Sebagai acuan alternatif dalam merancang beton *geopolymer* dengan campuran *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA) yang memiliki nilai kuat tekan yang baik.
3. Sebagai informasi kepada masyarakat bahwa limbah serat plastik PET dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan pencampuran beton *geopolymer*.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini dapat berjalan dengan lebih terarah dan fokus pada tujuan penelitian yang ingin dicapai maka perlu dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Limbah *fly ash* yang digunakan diperoleh di PLTU Bosowa Energi di Jeneponto dan limbah *rice husk ash* yang digunakan diperoleh dari pembakaran tungku di Danau Mawang, Gowa.
2. Dilakukan pengujian mikrostruktur material *fly ash* (FA) dan *rice husk ash* (RHA), yakni X-ray Fluorescence (XRF) dan Scanning Electron Microscopy (SEM) di Laboratorium Pusat Penelitian Nanosains dan Nanoteknologi, Institut Teknologi Bandung.
3. Material pasir dan batu pecah yang digunakan diambil dari PT Wika Beton Makassar.
4. Benda uji silinder dengan dimensi diameter 100 mm dan tinggi 200 mm.
5. Pengujian dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin dengan mengikuti prosedur yang sesuai dengan standar pengujian yang berlaku di Indonesia (SNI).

1.6 Sistematika Penulisan

Agar lebih terarah, sistematika penulisan yang akan dilakukan sesuai tahapan-tahapan yang dipersyaratkan sehingga tugas akhir yang dihasilkan lebih sistematis. Sistematika penulisan penelitian ini dapat diurutkan yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Pokok-pokok bahasan dalam bab ini meliputi latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini, diuraikan secara sistematis tentang teori dan pemikiran yakni penelitian terdahulu, beton *geopolymer*, material penyusun beton *geopolymer*, pemeriksaan karakteristik agregat, pengujian mikrostruktur, kuat tekan, dan implementasi beton *geopolymer*.

BAB III METODE PENELITIAN

Dalam bab ini, dijelaskan metode yang digunakan dalam penelitian ini, langkah-langkah yang digunakan dalam penelitian ini yaitu bagan alir penelitian, lokasi dan waktu penelitian, data penelitian berupa jenis dan sumber data serta analisis yang digunakan dalam mengolah data yang didapatkan dari lapangan maupun dari laboratorium.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bab ini, disusun hasil-hasil pengujian kuat tekan beton *geopolymer*.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

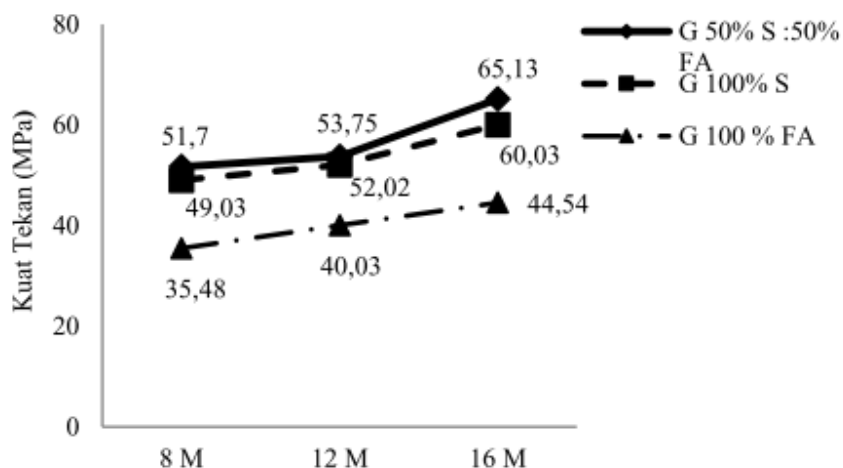
Merupakan bab yang menyimpulkan hasil dari analisis penelitian dan memberikan saran-saran dan rekomendasi penelitian.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

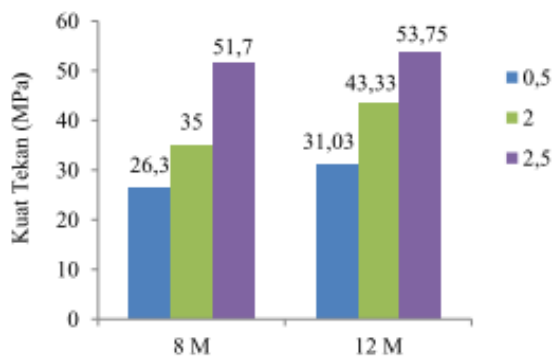
2.1 Penelitian Terdahulu

Solikin (2021) melakukan penelitian terkait beton *geopolymer* yang mencampurkan *fly ash* tipe F agar biaya pembuatan beton lebih murah. Studi literatur yang dilakukan bertujuan untuk menganalisis kuat tekan beton *geopolymer* kombinasi *slag* dan *fly ash* tipe F 1:1 dengan metode *curing* terhadap kuat tekan, dan biaya pembuatan beton *geopolymer*. Metode studi literatur ini dengan cara mengumpulkan data sekunder dari jurnal yang sudah dipublikasikan dari tahun 2015 – 2020. Dalam jurnal tersebut dipilih pemakaian *binder* yaitu *fly ash* tipe F dan *slag* dengan perbandingan 1:1, 100% *fly ash* tipe F, dan 100% *slag*. Batasan molaritas yang dianalisis pada kuat tekan dengan menggunakan kombinasi *binder fly ash* dan *slag* 1:1, 100% *fly ash*, dan 100% *slag* yaitu 8 M, 12 M, dan 16 M, sedangkan pada kuat tekan dengan rasio alkali aktivator ($\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{SiO}_3$) 0,5; 2; 2,5; menggunakan molaritas 8 M dan 12 M. batasan molaritas yang dianalisis pada metode *curing* dan perbedaan harga beton yaitu menggunakan 8 M dan 12 M dengan rasio 2,5. Jumlah jurnal yang digunakan sebanyak 20 jurnal dari internasional dan nasional dengan rentang tahun 2015 – 2020. Kuat tekan beton adalah besarnya beban maksimum persatuan luas, yang menyebabkan benda uji beton menjadi hancur bila dibebani dengan gaya beban tertentu yang dihasilkan oleh mesin kuat tekan. Pada studi literatur ini menggunakan bahan pengganti semen dengan kombinasi *fly ash* tipe F dan *slag* perbandingan 1:1, 100% *fly ash*, 100% *slag* dengan molaritas NaOH 8M, 12M, dan 16M dengan rasio alkali aktivator 2,5. Dimana rasio alkali aktivator adalah perbandingan antara sodium silikat dan sodium hidroksida. Cara untuk memperoleh data tersebut dengan mencari jurnal dimana jurnal tersebut menggunakan 50% S : 50% FA, 100% S, dan 100% FA tanpa ada campuran bahan adiktif lainnya dengan umur pengujian kuat tekan 28 hari. Didapatkan data kuat tekan rata-rata pada penggunaan 100% FA sebesar 35,48 MPa diperoleh dari rata-rata 2 jurnal, nilai kuat tekan 40,03 MPa diperoleh dari rata-rata 2 jurnal, dan nilai kuat tekan 44,54 MPa diperoleh dari rata-rata 1 jurnal. Nilai kuat tekan pada penggunaan 100% S sebesar 49,03 MPa diperoleh dari rata-rata 3 jurnal, nilai kuat tekan 52,02

MPa diperoleh dari rata-rata 3 jurnal, dan nilai kuat tekan 60,03 MPa diperoleh dari rata-rata 2 jurnal. Nilai kuat tekan pada penggunaan 50% S : 50% FA sebesar 51,7 MPa diperoleh dari rata-rata 3 jurnal, nilai kuat tekan 53,75 MPa diperoleh dari rata-rata 3 jurnal, dan nilai kuat tekan 65,75 MPa diperoleh dari rata-rata 2 jurnal.

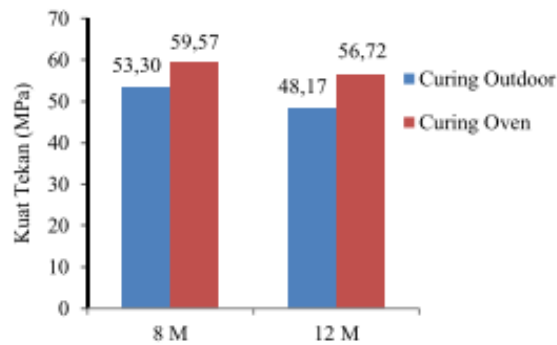


Gambar 1 Hubungan antara molaritas dan kuat tekan beton *geopolymer* kombinasi *fly ash* tipe f dan slag 1:1, 100% slag, dan 100% *fly ash* tipe f

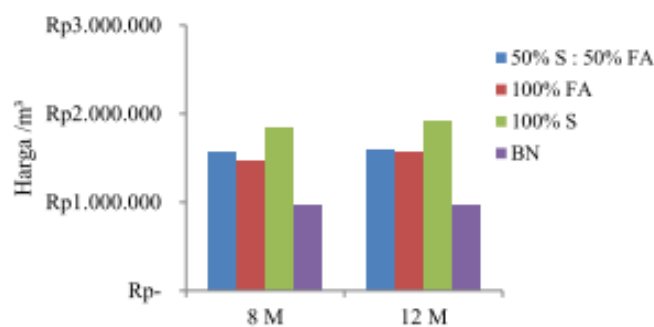


Gambar 2. Hubungan Kuat Tekan Penggunaan *Fly Ash* Dan *Slag* 1:1 Dengan Variasi Rasio Alkali Aktivator

Gambar 2 Hubungan kuat tekan penggunaan *fly ash* dan *slag* 1:1 dengan variasi alkali aktivator

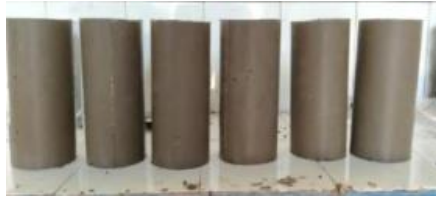


Gambar 3 Pengaruh metode *curing* terhadap kuat tekan beton *geopolymer* dengan penggunaan *fly ash* dan *slag* 1:1



Gambar 4 Perbedaan harga beton *geopolymer* dengan kombinasi pemakaian *slag* dan *fly ash* 1:1, 100% *slag*, 100% *fly ash* terhadap beton normal

Budiningrum dkk. (2021) melakukan penelitian tentang perilaku tekan beton *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* sebagai studi experimental. Metode desain beton *geopolymer* yakni sama dengan beton semen dikarenakan *mix design* beton *geopolymer* belum terdapat standarnya sampai saat ini. Adapun komposisi utama beton *geopolymer* adalah agregat, larutan alkali dan prekursor, agregat kasar dengan kandungan 70 – 75%, sedangkan untuk kandungan larutan alkali dan prekursor 20 – 35%. Larutan alkali sebagai aktivator berupa Natrium Hidroksida (NaOH) yang berfungsi untuk mereaksikan bahan pengikat dengan senyawa yang terdapat dalam *fly ash* dan natrium silikat (Na_2SiO_3) yang berguna untuk mempercepat proses polimerisasi, sedangkan prekursornya adalah *fly ash*. Benda uji yang digunakan adalah silinder ukuran 10 x 20 cm dengan umur pengujian selama 14 dan 28 hari. Jumlah benda uji sampel beton yang digunakan masing-masing adalah 6 sampel.



Gambar 5 Contoh benda uji silinder beton *geopolymer* 10/20

Dari hasil pengujian kuat tekan beton *geopolymer* diperoleh kesimpulan bahwa hasil nilai kuat tekan beton *geopolymer* pada umur 14 hari adalah 19,45 MPa dan 28 hari adalah 22,99 MPa untuk nilai *slump test* sebesar 70 cm. Kuat tekan beton *geopolymer* mengalami tren peningkatan kuat tekan rata-rata sebesar 3,54 MPa atau 18,2%. Hasil pemeriksaan berat volume beton *geopolymer* tidak ada perbedaan yang signifikan dari umur 14 hari ke 28 hari.

Karakterisasi material *fly ash* dan *rice husk ash* dilakukan untuk menentukan karakteristik dari mikrostruktur material. Beberapa instrumen yang bisa dilakukan, salah satunya adalah XRF. Istomo dan Nurlala (2020) melakukan karakterisasi dan proporsi *fly ash* dalam penggunaan PCC (*portland composite cement*) menggunakan pengujian XRF. Kemudian, Sapei dkk. (2015) juga melakukan karakterisasi material *rice husk ash* menggunakan pengujian XRF. Pengujian XRF ini bertujuan untuk mengetahui kandungan oksida pada suatu material, dan terlihat pada Tabel 1 bahwa unsur yang dominan ada silika (Si) pada masing-masing material, tetapi silika (Si) yang lebih besar dicapai pada material *rice husk ash*. Adapun rekapitulasi hasil pengujian XRF pada *fly ash* dan *rice husk ash* sebagai berikut.

Tabel 1 Rekapitulasi hasil uji XRF *fly ash* dan *rice husk ash*

Sampel	Kadar Elemen (%)	
	<i>Fly ash</i>	<i>Rice husk ash</i>
SiO	44.85	84.70
Al ₂ O ₃	20.70	4.68
CaO	15.13	5.83
Fe ₂ O ₃	21.26	1.22
MgO	12.42	1.56

SO ₃	2.14	0.22
LOI (%)	8.71	1.79

Sulianti dkk. (2021) menunjukkan bahwa hasil pengujian beton *geopolymer* menggunakan beberapa variasi komposisi bahan pengganti semen yakni *fly ash* dan *rice husk ash* yang direaksikan dengan alkali aktivator NaOH : Na₂SiO₃ = 1 : 5. *Fly ash* dan *rice husk ash* divariasikan berturut-turut 100%:0%, 75%:25%, 50%:50%, dan 25%:75%. Pengujian kuat tekan dilakukan pada umur 28 hari dan diperoleh hasil berturut-turut 395.643 kg/cm², 393.903 kg/cm², 392.616 kg/cm², dan 391.256 kg/cm². Kesimpulan lain diperoleh bahwa *rice husk ash* tidak bisa dipakai sebagai bahan pengganti semen untuk beton *geopolymer* karena mengandung silika (Si) yang berlebih, sehingga tidak bisa bereaksi dengan larutan alkali aktivator (sodium silikat dan sodium hidroksida) dan menyebabkan tidak terjadinya pengerasan pada beton serta kuat tekan menurun.

Firdaus dan Nada (2023) meneliti terkait pengaruh penambahan *rice husk ash* terhadap kuat tekan mortar *geopolymer* berbasis *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag*. *Rice husk ash* tersusun dari lebih 90% silika (SiO₂), sehingga material ini berpotensi sebagai bahan pozzolan untuk menggantikan semen. Penelitian ini menggunakan *fly ash* dan *ground granulated blast furnace slag* sebagai pengganti semen dengan penambahan *rice husk ash* 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, dan 25% yang diaktivasi larutan alkali dengan dikenakan perlakuan *over curing* pada temperatur 60 °C selama 24 jam. Adapun hasil uji kuat tekan rata-rata tertinggi dicapai pada mortar *geopolymer* variasi penambahan RHA 5% pada umur 56 hari sebesar 52.99 ± 1.30 MPa. Rasio optimum penambahan RHA berbasis *fly ash* dan GGBFS sebesar 5%. Peningkatan nilai kuat tekan mortar berbanding lurus dengan peningkatan nilai densitasnya. Selain itu, kuat tekan akan mengalami peningkatan seiring bertambahnya waktu *curing*, namun akan mengalami penurunan seiring bertambahnya persentase RHA dalam mortar.

Handayani dkk. (2021) melakukan penelitian terkait perilaku kuat tekan beton normal dengan penambahan serat botol plastik jenis PET (variasi 0%, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8%, dan 1%). Diyakini bahwa limbah plastik ini merupakan material yang

membutuhkan waktu yang lama untuk terurai dan akan menumpuk di bumi dalam waktu yang lama, sehingga perlunya suatu pemanfaatan dari sampah plastik tersebut yakni sebagai material pencampuran beton. Beton yang digunakan dalam pengujian adalah beton normal dengan kuat tekan rencana ($f'_c = 20$ MPa). Benda uji dibuat berupa benda uji beton silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm.

Analisis yang dilakukan adalah analisis hubungan antara variasi serat PET terhadap campuran beton, dengan mengacu pada nilai *slump test*, berat jenis beton normal akibat penambahan serat limbah botol plastik, derajat keasaman air campuran beton, dan kuat tekan beton. Dari hasil penelitian yang dilakukan terhadap kuat tekan beton dapat dilihat pada penambahan serat PET sebanyak 0,2% dan 0,4% dan juga beton dengan tambahan serat PET 0,6% dan 0,8%. Dari hasil bacaan kuat tekan terlihat bahwa untuk beton dengan tambahan PET sebanyak 0,2% memiliki kuat tekan yang lebih besar dari beton dengan tambahan PET 0,4%. Begitu juga dengan beton yang memiliki tambahan PET 0,6% dan 0,8% yang juga dibuat bersamaan, beton dengan tambahan PET 0,6% memiliki kuat tekan yang lebih besar dari beton dengan tambahan PET 0,8%, sehingga dengan adanya penambahan serat PET untuk sampel yang dibuat secara bersamaan akan memperkecil nilai kuat tekan beton tersebut. Kendala yang dihadapi pada saat pengerjaan percobaan adalah sampel beton yang digunakan tidak semuanya bisa dibuat secara bersamaan untuk seluruh penambahan serat PET yang direncanakan karena terbatasnya kapasitas *concrete mixer*, sehingga pembuatan campuran beton dibagi menjadi beberapa tahapan, yang mana untuk satu kali campuran hanya dapat menghasilkan 6 sampel.

Penelitian lain yang dilakukan oleh Ilyas dkk. (2022) tentang studi beton *geopolymer* dengan bahan dasar *fly ash* terhadap kuat tekan beton. Metode yang digunakan mengacu pada uji eksperimental dengan memakai metode pencampuran beton cara DOE di Indonesia dikenal sebagai standar perencanaan oleh Departemen Pekerjaan Umum dan dimuat dalam standar SNI 03-2834-2000, Tata cara pembuatan rencana campuran beton normal mengingat belum ada standar khusus untuk beton *geopolymer* itu sendiri dalam hal pencampuran (*mix design*). Jumlah benda uji yang digunakan sebanyak 15 buah dengan benda uji *moulding* silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. perbandingan alkali aktivator Sodium Silikat dan Sodium Hidroksida (SS/SH) pada penelitian ini yaitu 1,5 sampai dengan

3,5 diambil berdasarkan dari penelitian Trisna dan Wardhono (2018), dengan nilai molaritas sebesar 10 M, dikarenakan nilai molar ideal untuk beton *geopolymer* adalah antara 8 M hingga 14 M dengan umur beton 28 hari.

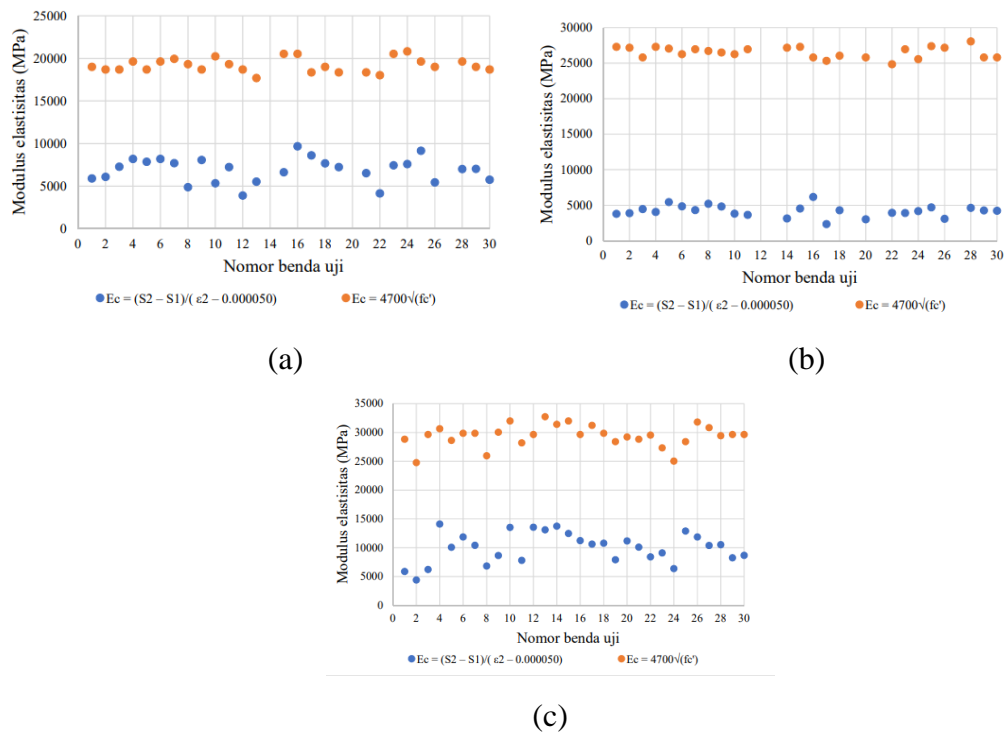
Tabel 2 Rancangan jumlah pembuatan benda uji

Kode Benda Uji	SS/SH	Molaritas
BG-1	1,5	10
BG-2	2,0	10
BG-3	2,5	10
BG-4	3,0	10
BG-5	3,5	10

Sumber: Ilyas dkk. (2022)

Berdasarkan hasil penelitian beton *geopolymer* didapatkan kesimpulan yaitu hasil kuat tekan beton *geopolymer* rata-rata dengan perbandingan SS/SH 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; dan 3,5 secara berturut-turut adalah 3,40 MPa, 7,11 MPa, 10,13 MPa, 9,07 MPa, dan 8,05 MPa. Nilai kuat tekan beton *geopolymer* dengan nilai perbandingan SS/SH hingga mencapai puncak pada variasi SS/SH 2,5 pada umur 28 hari mendapatkan 10,13 MPa serta mengalami peurunan hingga variasi SS/SH 3,5 dengan nilai kuat tekan 8,05 MPa. Dari hasil tersebut dapat dinyatakan bahwa perbandingan variasi SS/SH pada larutan aktivator terhadap beton *geopolymer* menghasilkan konsentrasi yang tidak linear berdasarkan hasil kuat tekan beton.

Penelitian terkait kuat tekan dari beton, umumnya tidak lepas dari nilai modulus elastisitas. Nilai ini sebanding dengan besaran kuat tekan dan untuk persamaan ini ada yang meliputi secara teori dan juga eksperimental. Salah satu peneliti yang dilakukan oleh Rofiq dan Al-khasan (2019), melakukan perbandingan modulus elastisitas beton mutu 12 MPa, 25 MPa, dan 45 MPa dengan menggunakan agregat sungai progo dan semen PCC. Di penelitian ini menggunakan sampel silinder beton untuk diuji tekan, dengan melalui berbagai pemeriksaan karakteristik untuk agregat hingga semen. Pada pengujian kuat tekan sebanyak 30 sampel, diperoleh nilai modulus elastisitas menggunakan persamaan ASTM C469 dan SNI 2847:2013, kemudian nilainya diperbandingkan sebagai berikut.



Gambar 6 Perbandingan nilai modulus elastisitas mutu; (a) 12 MPa, (b) 25 MPa, dan (c) 40 MPa

Berdasarkan grafik plot pada Gambar 6, hasil dari perbandingan antara nilai modulus elastisitas pada setiap mutu beton yang dihasilkan oleh persamaan dari ASTM C469 lebih rendah dari pada modulus elastisitas yang dihasilkan oleh persamaan dari SNI 2847:2013. Hal ini dapat terjadi karena beberapa faktor, seperti terkendala pembuatan sampel yang menyebabkan campuran tidak seragam dan bidang alas silinder beton yang tidak rata, serta saat pengujian yang kurang teliti dan akurat dalam penyimpanan benda uji sehingga beban yang diterima tidak sentris.

Pengujian *ultrasonic pulse velocity* (UPV) tidak lepas dari pengujian di laboratorium. Pengujian ini adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan kecepatan gelombang (m/s) melalui media beton dengan kekuatan tekan beton. Aribawa dkk. (2019) melakukan penelitian tentang evaluasi pengaruh mutu beton terhadap kekuatan struktur beton normal menggunakan *non-destructive test* dan *desctructive test* yakni UPV dan kuat tekan. Mutu yang direncanakan sebesar K250 dengan jumlah sampel sebanyak 3

buah. Adapun tabel rekapitulasi pengujian UPV dan kuat tekan beton sebagai berikut.

Tabel 3 Rekapitulasi UPV dan kuat tekan beton

Mutu Rencana	Sampel	Kuat tekan (MPa)	Cepat rambat gelombang (m/s)	Kualitas beton
K250	1	21.051	3538	<i>Good</i>
	2	21.899	3580	<i>Good</i>
	3	28.557	3713	<i>Good</i>

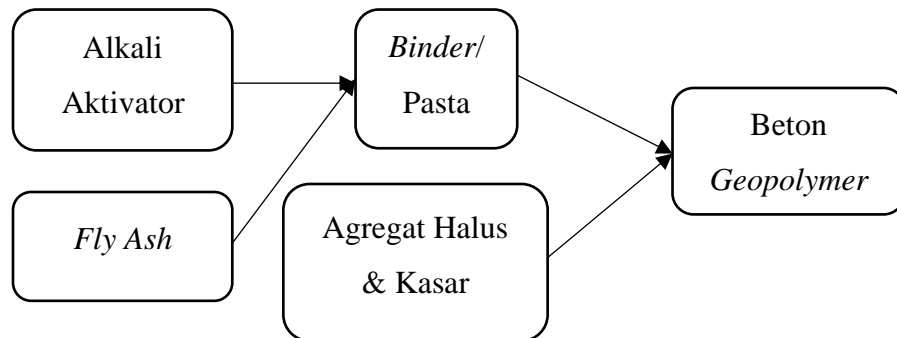
2.2 Beton Geopolymer

Geopolymer merupakan material ramah lingkungan yang biasa dikembangkan sebagai alternatif pengganti beton semen di masa mendatang. Jenis material beton ini tersusun dari sintesa bahan-bahan non-organik melalui polimerisasi. Bahan dasar utama beton tersebut mengandung banyak silika dan alumina. Unsur-unsur tersebut banyak terdapat pada material buangan hasil industri, seperti *fly ash*, sisa pembakaran batu bara (Budiningrum dkk., 2021).

Proses pembuatan beton *geopolymer* membutuhkan alkali aktivator sebagai pereaksi kandungan silika dan alumina yang terkandung dalam *fly ash* karena material ini tidak bersifat *cementitious*. Aktivator yang umum digunakan adalah sodium hidroksida dan sodium silikat. Sodium silikat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi, sedangkan sodium hidroksida berfungsi untuk mereaksikan unsur-unsur alumina dan silika yang terkandung, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Semakin tinggi molaritas yang digunakan, maka semakin tinggi pula kuat tekan dan kuat tarik belah yang dihasilkan. Walaupun demikian ditemukan bahwa beton *geopolymer* bersifat lebih getas daripada beton konvensional (Ekaputri dan Triwulan, 2013).

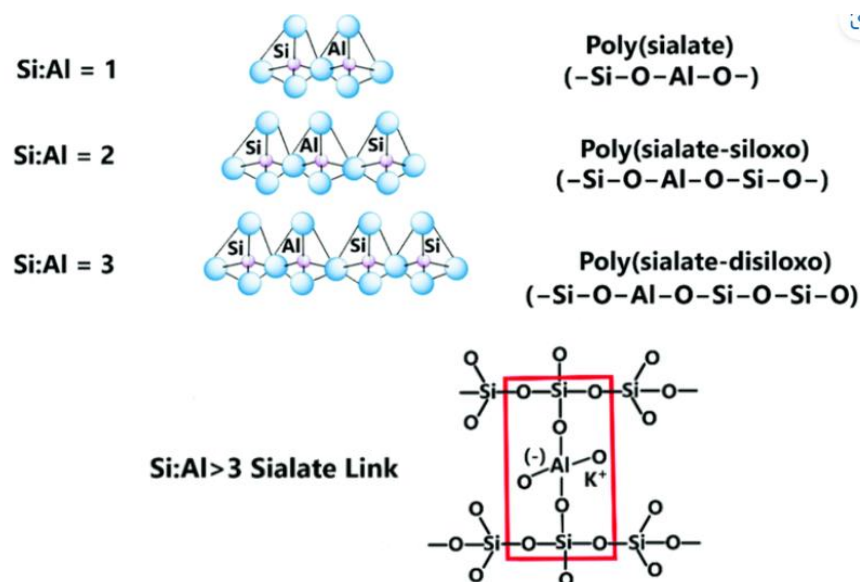
Seperti halnya semen, *fly ash* yang sudah dicampur dengan alkali aktivator membutuhkan waktu untuk dapat bereaksi hingga mengeras. Pada pengujian *setting time* pada semen dipengaruhi oleh jenis semen dan jumlah air yang digunakan, maka pada *fly ash*, *setting time* sangat dipengaruhi oleh klasifikasi kelasnya, jumlah

perbandingan *fly ash* dengan alkali aktivator, dan juga dipengaruhi oleh tingkat molaritas alkali aktivator yang digunakan. Sebuah studi mengatakan bahwa aktivator yang umumnya digunakan adalah sodium hidroksida 8 M sampai 14 M dan sodium silikat dengan perbandingan antara 0,5 sampai 2,5. Berikut gambaran konsep dasar produksi beton *geopolymer* dapat dilihat pada Gambar 7 di bawah ini.



Gambar 7 Konsep dasar produksi beton *geopolymer*

Davidovits (1999) menggolongkan polysialate menjadi 3 tipe, yaitu: Poly(sialate) $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}$, Poly(sialate-siloxo) $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ dan Poly(sialate-disiloxo) $-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}$.



Gambar 8 Polimerisasi beton *geopolymer*

Air dilepaskan selama reaksi kimia terjadi dalam pembentukan beton polimer. Air ini dikeluarkan dari beton polimer selama masa perawatan dan pengeringan. Hal ini memberikan keuntungan bagi *performance* beton polimer. Menurut Davidovits (1999), polimer dapat digunakan sebagai pelindung api, keramik, batu bata, semen rendah CO₂, beton, imobilisasi limbah beracun dan bahan radioaktif. Adapun keuntungan beton polimer:

- a. Tahan terhadap api;
- b. Tahan terhadap lingkungan korosif;
- c. Tidak menggunakan semen sebagai bahan perekatnya, maka dapat mengurangi polusi udara;
- d. Mempunyai rangkai susut kecil;
- e. Memiliki *water absorption* kurang dari 3%.

2.3 Material Penyusun Beton Geopolymer

Material penyusun pada beton *Geopolymer* dengan campuran *fly ash* dan alkali aktivator ini tidak berbeda dengan material penyusun beton pada umumnya. Beton geopolimer terdiri dari agregat kasar, agregat halus, dan air. NaOH dilarutkan dengan aquades, kemudian dicampur dengan Na₂SiO₃. Secara umum, beton *geopolymer* merupakan varian yang memiliki nilai *slump* tinggi, tetapi cepat mengeras sehingga menurunkan *workability*. Namun disamping itu, beton ini mampu mencapai kuat tekan 70% dalam waktu 4 jam pertama. Seperti halnya semen, abu terbang yang sudah dicampur dengan alkali aktivator membutuhkan waktu untuk dapat bereaksi hingga pada akhirnya mengeras. *Setting time* pada semen dipengaruhi oleh jenis semen dan jumlah air yang digunakan, sedangkan *setting time* pada abu terbang sangat dipengaruhi oleh kelas *fly ash* yang digunakan, jumlah perbandingan *fly ash* dengan alkali aktivator, dan juga dipengaruhi tingkat Molaritas alkali aktivator yang digunakan.

2.3.1 Fly Ash

Fly ash adalah limbah padat yang dihasilkan dari pembakaran batu bara pada PLTU. Material *fly ash* dikategorikan dalam material pozzolan yakni bahan yang

mengandung senyawa silika dan alumina yang tidak mempunyai sifat seperti semen, akan tetapi bentuknya yang halus dan jika senyawa-senyawa tersebut bereaksi secara kimia dengan cairan alkalin pada temperatur tertentu dapat membentuk material campuran yang memiliki sifat seperti semen. Material pozzolan ini dapat mengurangi pemuai akibat proses reaksi alkalin dan agregat sehingga dapat mengurangi retak-retak pada beton.

Berdasarkan ASTM C618 – 19, *fly ash* diklasifikasikan atas 3 kelas berdasarkan komposisi kimianya yaitu *fly ash* kelas F, kelas C, dan kelas N. Dimana *fly ash* kelas F merupakan hasil dari batu bara bitumen dengan kandungan kalsium yang rendah kurang dari 10% CaO. Sedangkan kelas C merupakan hasil dari batu bara sub-bitumen dengan kandungan kalsium yang tinggi di atas 20% CaO. Dibandingkan dengan *fly ash* kelas F, *fly ash* kelas C lebih mampu meningkatkan mutu kuat tekan beton karena kandungan kalsium yang tinggi dan mampu mengurangi kadar air karena memiliki bentuk partikel yang bulat dan ukuran yang kecil sehingga mampu mengisi rongga-rongga kecil yang kosong. Adapun kelas N merupakan pozzolan alam, seperti tanah diatome, shale, tufa, dan abu gunung berapi atau *pumice*.

Tabel 4 Komposisi unsur senyawa kimia *fly ash*

Senyawa Kimia	Kelas N	Kelas F	Kelas C
SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , minimal (%)	70.0	50.0	50.0
SO ₃ , maksimum (%)	4.0	5.0	5.0
CaO (%)	-	18.0 (maks.)	> 18.0
Kadar Kelembaban, maksimum (%)	3.0	3.0	3.0
LOI, maksimum (%)	10	6.0	6.0

Sumber: ASTM C618 – 19 (2019)

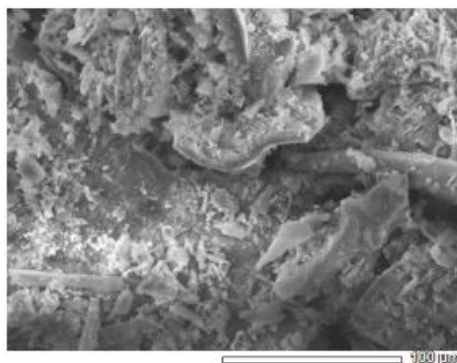
Perencanaan pada *mix design* memberi pengaruh terhadap pembuatan beton *geopolymer*. Namun, perlu dipertimbangkan juga beberapa hal yang terkait dengan karakteristik dari *fly ash* yang digunakan. Jenis dari *fly ash* bisa memengaruhi kekuatan dari beton *geopolymer*. Kandungan kimia, ukuran partikel, dan *degree of*

vitrification pada saat pendinginan memberi pengaruh yang besar pada pembuatan beton *geopolymer*. Banyak hal yang dipengaruhi oleh jenis *fly ash* yang digunakan, salah satu yang bermasalah adalah *setting time* yang cepat. Hal ini disebabkan oleh kadar CaO yang tinggi. Apabila ingin memperlambat *setting time* dengan cara menggunakan *fly ash* yang memiliki kadar CaO lebih rendah, tetapi akan mengakibatkan pengurangan pada kekuatan beton *geopolymer* (Purwantoro dkk., 2016).

2.3.2 Rice Husk Ash

Rice husk ash atau yang biasa disebut abu sekam padi merupakan produk sampingan pertanian yang dihasilkan dengan membakar sekam padi. Abu sekam padi ini bisa digunakan sebagai pupuk untuk tanaman dan juga sebagai bahan campuran beton karena abu sekam padi mengandung silika yang tinggi. Abu sekam padi memiliki kandungan silika yang tinggi karena tanaman padi menyerap silika dari tanah dan menyimpannya dalam biji-bijian dan sekam yang menutupi biji-bijian (Mohseni dkk., 2019).

Sekam padi yang dibakar pada temperatur 600 – 900 °C akan menghasilkan abu sekam berkisar 16 – 25% yang mengandung silika kadar tinggi sekitar 87 – 97%. Karena kandungan silika yang tinggi, abu sekam padi dapat digunakan sebagai kosmetik, dan detergen. Abu sekam padi yang dibakar dengan suhu berkisar 400 – 500 °C akan menjadi silika amorphous sedangkan abu sekam padi yang dibakar dengan suhu lebih dari 1000 °C akan menghasilkan silika kristalin.



Gambar 9 Struktur RHA yang dilihat dari mikroskop

Sumber: Sandya dkk. (2019)

2.3.3 Alkali Aktivator

Aktivator merupakan senyawa yang akan digunakan agar terjadi polimerisasi pada beton *geopolymer*. Hidroksida pada aktivator akan bereaksi dengan silika dan alumina pada *fly ash* dan melepas H₂O sebagai sisa polimerisasi. NaOH merupakan aktivator pada beton *geopolymer* berbahan dasar *fly ash* yang bisa memberi pengaruh pada kuat tekan beton *geopolymer*. Semakin tinggi konsentrasi NaOH maka kekuatan beton *geopolymer* akan lebih tinggi. Hal ini disebabkan jumlah mol akan semakin banyak, sehingga reaksi polimernya akan semakin kuat. Na₂SiO₃ merupakan salah satu unsur yang berperan penting dalam proses polimerisasi yang berfungsi untuk mempercepat proses polimer (Salain dkk., 2020).

Sodium Hidroksida (NaOH) dan Sodium silikat (Na₂SiO₃) dapat digunakan sebagai alkali aktivator beton *geopolymer*. Sodium silikat (Na₂SiO₃) dapat berfungsi untuk mempercepat reaksi polimerisasi yang terjadi pada beton polimer, sedangkan sodium hidroksida (NaOH) berfungsi untuk mereaksikan unsur silika dan alumina yang terkandung dalam *fly ash*, sehingga dapat menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Adapun cara pembuatan alkali aktivator sebagai berikut.

- a. Membuat Larutan NaOH (contoh untuk 10 M) dengan volume 1 L:
 1. Persiapkan alat dan bahan yang akan digunakan.
 2. Menghitung jumlah padatan NaOH yang dibutuhkan untuk konsentrasi 10 M sebanyak 1 L.

$$M_{\text{NaOH}} = 23 + 16 + 1 = 40$$

$$M_{\text{NaOH}} = 10 \text{ M}$$

$$V_{\text{NaOH}} = \frac{1000 \text{ ml}}{1 \text{ L}}$$

$$M = \frac{gr}{Mr} \times \frac{1000}{V}$$

$$10 = \frac{gr}{40} \times \frac{1000}{1000} = 400 \text{ gram}$$
 3. Menimbang padatan NaOH sebanyak 400 g.
 4. Larutkan padatan NaOH yang sudah ditimbang kedalam gelas kimia, diaduk menggunakan spatula dan ditambahkan aquades sedikit demi sedikit sampai larut.
 5. Setelah larut, pindahkan larutan kedalam labu takar ukuran 1 L.

6. Tambahkan aquades kedalam labu takar hingga tanda batas.
 7. Homogenkan larutan yang ada didalam labu takar.
 8. Kemudian masukkan larutan kedalam wadah yang telah disediakan.
- b. Setelah melarutkan NaOH 10 M, Kemudian timbang NaOH cair dan juga Na_2SiO_3 sesuai yang di perlukan.
 - c. Larutkan NaOH dan Na_2SiO_3 sampai dengan homogen
 - d. alkali aktivator siap digunakan

2.3.4 Agregat Halus

Agregat halus dapat berupa pasir alam, pasir hasil olahan atau gabungan dari kedua pasir tersebut. Sesuai dengan ASTM C33 – 07, bahwa agregat halus merupakan agregat yang mempunyai ukuran butir maksimum sebesar 4,75 mm. Adapun syarat-syarat agregat halus (pasir) untuk campuran beton adalah sebagai berikut :

1. Kadar lumpur Atau bagian butir yang lebih kecil dari 75 mikron (ayakan no. 200) dalam % berat maksimum:
 - a. Untuk beton yang mengalami abrasi, 3 %.
 - b. Untuk beton jenis lainnya, 5.0 %.
2. Kadar gumpalan tanah liat dan partikel yang mudah direpihkan (Friable partikel), maksimum 0,5 %.
3. Kandungan arang dan lignit
4. Bebas dari zat organik yang merugikan beton.
5. Tidak boleh mengandung bahan yang reaktif terhadap alkali jika agregat halus digunakan untuk membuat beton yang akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah. Agregat yang reaktif terhadap alkali boleh untuk membuat beton dengan semen yang kadar alkalinya dihitung setara Natrium Oksida ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{K}_2\text{O}$) tidak lebih dari 0,6 %, atau dengan menambahkan bahan yang dapat mencegah terjadinya pemuaihan yang dapat membahayakan oleh karena reaksi alkali- agregat tersebut.
6. Sifat kekal, diuji dengan larutan garam sulfat
 - a. Jika dipakai Natrium Sulfat, bagian hancur maksimum 10 %.

b. Jika dipakai Magnesium Sulfat, bagian hancur maksimum 15 %.

7. Susunan besar butir (grading)

Agregat halus harus mempunyai susunan besar butir dalam batas-batas berikut:

Tabel 5 Persentase Lolos Agregat Halus pada Ayakan

Ukuran lubang ayakan (mm)	Persen lolos kumulatif
9,5	100
4,75	95 – 100
2,36	80 – 100
1,18	50 – 85
0,60	25 – 60
0,30	10 – 30
0,15	2 – 10

Sumber: ASTM C33 – 07 (2007)

2.3.5 Agregat Kasar

Agregat kasar dapat berupa kerikil, pecahan kerikil, batu pecah, terak tanur tiup atau beton semen hidrolis yang dipecah. Sesuai dengan ASTM C33 – 07, bahwa agregat kasar merupakan agregat yang mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm. Agregat kasar (kerikil/batu pecah) yang akan dipakai untuk membuat campuran beton harus memenuhi persyaratan-persyaratannya sebagai berikut.

1. Kerikil atau batu pecah harus terdiri dari butir-butir yang keras dan tidak berpori serta mempunyai sifat kekal.
2. Agregat yang mengandung butir-butir pipih hanya dapat dipakai apabila jumlah butir-butir pipih tersebut tidak melebihi 20% dari berat agregat seluruhnya.
3. Tidak boleh mengandung bahan yang reaktif terhadap alkali jika agregat kasar digunakan untuk membuat beton yang akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah. Agregat yang reaktif terhadap alkali boleh untuk membuat beton dengan semen yang kadar alkalinya dihitung setara NaOH tidak lebih dari 0,6 %, atau dengan menambahkan bahan yang dapat mencegah terjadinya pemuaiannya yang dapat membahayakan oleh karena reaksi alkali tersebut

4. Tidak boleh mengandung bahan yang reaktif terhadap alkali jika agregat kasar digunakan untuk membuat beton yang akan mengalami basah dan lembab terus menerus atau yang akan berhubungan dengan tanah basah. Agregat yang reaktif terhadap alkali boleh untuk membuat beton dengan semen yang kadar alkalinya dihitung setara Natrium Oksida tidak lebih dari 0,6 %, atau dengan menambahkan bahan yang dapat mencegah terjadinya pemuaihan yang dapat membahayakan oleh karena reaksi alkali-agregat tersebut.
5. yang dapat membahayakan oleh karena reaksi alkali-agregat tersebut.
6. Sifat kekal dari agregat kasar dapat diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut :
 - a. Jika dipakai natrium sulfat (Na_2SO_4), bagian yang hancur maksimum 12% berat agregat.
 - b. Jika dipakai magnesium sulfat (MgSO_4), bagian yang hancur maksimum 12% berat agregat.
7. Agregat kasar tidak boleh mengandung bahan-bahan yang dapat merusak beton seperti bahan-bahan yang reaktif sekali dan harus dibuktikan dengan percobaan warna dengan larutan NaOH.
8. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (terhadap berat kering) dan apabila mengandung lebih dari 1%, agregat kasar tersebut harus dicuci.
9. yang dapat membahayakan oleh karena reaksi alkali-agregat tersebut.
10. Sifat kekal dari agregat kasar dapat diuji dengan larutan jenuh garam sulfat sebagai berikut :
 - a. Jika dipakai natrium sulfat (Na_2SO_4), bagian yang hancur maksimum 12% berat agregat.
 - b. Jika dipakai magnesium sulfat (MgSO_4), bagian yang hancur maksimum 12% berat agregat.
11. Agregat kasar tidak boleh mengandung bahan-bahan yang dapat merusak beton yang reaktif sekali dan harus dibuktikan dengan percobaan warna dengan larutan NaOH.
12. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% dan apabila mengandung lebih dari 1%, agregat kasar tersebut harus dicuci.

13. Agregat kasar tidak boleh mengandung bahan-bahan yang dapat merusak beton seperti bahan-bahan yang reaktif sekali dan harus dibuktikan dengan percobaan warna dengan larutan NaOH.
14. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% (terhadap berat kering) dan apabila mengandung lebih dari 1%, agregat kasar tersebut harus dicuci.
15. Kekerasan dari agregat kasar diperiksa dengan bejana penguji dari Rudeloff dengan beban pengji 20 ton dan harus memenuhi syarat- syarat sebagai berikut:
 - a. Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 9,5-19 mm lebih dari 24% berat.
 - b. Tidak terjadi pembubukan sampai fraksi 19-30 mm lebih dari 22% berat.
16. Agregat kasar harus terdiri dari butir-butir yang beraneka ragam besarnya dan apabila diayak dengan ayakan standard ISO harus memenuhi syarat sebagai berikut.
17. Besar butir agregat kasar maksimum tidak boleh lebih daripada $\frac{1}{5}$ jarak terkecil antara bidang-bidang samping cetakan, $\frac{1}{3}$ dari tebal pelat atau $\frac{3}{4}$ dari dari jarak bersih minimum antara batang-batang atau berkas tulangan.
 Agregat kasar harus mempunyai susunan besar butir dalam batas-batas berikut:

Tabel 6 Pembagian gradasi agregat kasar

Diameter Ayakan	Persentase Lolos (%)		
	Ukuran Maks. 10 mm	Ukuran Maks. 20 mm	Ukuran Maks. 40 m.
75 mm (3")	-	-	100 – 100
37.5 mm (1 ½")	-	100 – 100	95 – 100
19.0 mm (¾")	100 – 100	95 – 100	35 – 70
9.50 mm (3/8")	50 – 85	30 – 60	10 – 40
4.75 mm (No. 4)	0 – 10	0 – 10	0 – 5

Sumber: ASTM C33 – 07 (2007)

2.3.6 Bahan Tambah (*Admixtures*)

a. *Superplasticizer*

Dalam pelaksanaan pekerjaan konstruksi di lapangan, *superplasticizer* sering digunakan sebagai *chemical admixture* yang memiliki fungsi dalam memperbaiki kinerja beton. Bahan dasar *superplasticizer* adalah tipe polycarboxylate dan naphthalene. Berdasarkan ASTM C494 – 19, “*Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*”, *superplasticizer* mempunyai keistimewaan dalam penggunaannya dalam campuran pembentuk elemen konstruksi, yakni meningkatkan kinerja beton walaupun dengan jumlah faktor air semen yang lebih sedikit, meningkatkan *workability* campuran dengan jumlah air yang sedikit, dan mencegah terjadinya korosi pada tulangan akibat meningkatnya kepadatan.

Pengaruh *superplasticizer* cukup efektif untuk memperbaiki kelecakan beton *geopolymer*, di mana beton segar menjadi lebih encer dan mudah dilakukan pemadatan saat dituang ke dalam cetakan. Bahan tambah ini juga mampu meningkatkan kekuatan beton *geopolymer* namun besaran hanya mencapai 5.42%. Dosis *superplasticizer* akan optimum pada persentase 1.5% terhadap berat *fly ash*.

b. *Retarder*

Retarder adalah bahan kimia pembantu untuk memperlambat waktu pengikatan (*setting time*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workable*) untuk waktu yang lebih lama. Temperatur setinggi 30 – 32 °C atau lebih sering menyebabkan makin cepatnya *hardening*, yang menyebabkan sukarnya penuangan dan penyelesaian. Cara kerja retarder dalam memperlambat waktu ikat awal adalah dengan memecah senyawa residu hasil reaksi hidrasi semen berupa Ca(OH)_2 atau yang biasa disebut kalsium hidroksida menjadi OH dan garam Ca. *Retarder* akan membungkus butir semen dengan OH sehingga memperlambat reaksi awal dari hidrasinya. Terbentuknya garam Ca dalam air mengurangi konsentrasi ion Ca dan memperlambat kristalisasi selama fase hidrasi.

2.3.7 Serat Plastik PET

Limbah botol plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) adalah material yang membutuhkan waktu yang lama untuk terurai kembali. Jumlah sampah plastik yang ada di dunia saat ini sudah mencapai angka 300 juta ton dalam setahun yang jika dipadatkan akan sama dengan 10 kali keliling bumi. Oleh karena itu diperlukan suatu pemanfaatan kembali dari sampah plastik tersebut.

Salah satu cara pemanfaatan kembali plastik PET ini yakni digunakan sebagai bahan tambahan pada campuran beton. Yosi (2019) melakukan penelitian dengan perbandingan berat isi beton serta kuat tekan beton antara beton dengan persentase 1%, 2%, dan 3% serat plastik PET sebagai pengganti agregat halus pada beton dan beton dengan campuran normal. Sampel beton dibuat dengan bentuk silinder dan dimensinya adalah 11 cm x 12 cm dengan mutu rencana 25 Mpa. Sampel diuji pada hari ke-7, 14, dan 28 hari. Hasil penelitian menunjukkan penurunan berat isi maksimum berkisar 1% - 4% dan penurunan berat isi maksimum terjadi pada penggunaan serat plastik PET sebesar 3%. Kuat tekan beton pada hari ke-28 dengan penggunaan serat plastik sebanyak 1% mencapai 16,48 Mpa dan meningkat sebesar 23,684% dibandingkan beton normal. Plastik PET ini dipotong menjadi serat berukuran 1 – 3 mm dengan panjang 2,5 cm pada adukan beton.

Beton dengan campuran limbah plastik PET merupakan salah satu solusi dalam mengurangi jumlah limbah plastik yang ada di lingkungan. Plastik PET yang berasal dari botol plastik dipotong memanjang hingga berbentuk layaknya serat. Penambahan serat dalam campuran beton mengikat beton memiliki kekuatan tarik yang lemah (Alfirahman dan Widodo, 2023).

Plastik PET adalah suatu resin polimer plastik termoplast dari kelompok poliester. PET banyak diproduksi dalam industri kimia dan digunakan sebagai botol minuman dan wadah makana, serta dikombinasikan dengan serat kaca dalam resin teknik. PET merupakan salah satu bahan mentah terpenting dalam kerajinan tekstil. Rumus kimia dari PET adalah $(-\text{CO}-\text{C}_6\text{H}_5-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{O})_n$. plastik PET ditandai dengan kode daur ulang nomor 1, misalkan botol air mineral. PET memiliki titik luluh yang relatif tinggi, kekuatan (*strength*) yang tinggi, kaku (*stiffness*), dimensinya stabil, tahan bahan kimia dan panas, serta mempunyai sifat elektrikal

yang baik. Kekuatan tarik dari PET merupakan yang tertinggi dibandingkan plastikan dari bahan HDPE (*High Density Polyethylene*), PP (*Polypropylene*), dan LDPE (*Low Density Polyethylene*).

Adapun penelitian yang telah dilakukan oleh Irmawaty dkk. (2020) tentang properti mekanis uji kuat tekan beton silinder menggunakan limbah plastik sebagai substitusi parsial terhadap agregat kasar, 3 benda uji silinder dengan ukuran 100 x 200 mm disiapkan untuk 4 variasi parsial yaitu 0%, 10%, 15%, dan 20% dengan nilai *water cement ratio* (w/c) sebesar 0.40 yang di uji tekan menggunakan alat UTM di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Adapun hasil yang diperoleh untuk nilai kuat tekan pada umur 28 hari untuk tiap variasi berturut-turut yakni 26.84 MPa, 21.14 MPa, 13.86 MPa, dan 12.84 MPa. Dapat disimpulkan bahwa kuat tekan beton menurun seiring dengan kenaikan persentase plastik PET. Pada penambahan palstik PET lebih dari 10%, kuat tekan mengalami penurunan drastis sebesar 48%. Oleh karena itu, pengganti parsial terhadap volume agregat kasar hanya dibatasi hingga 10% saja.

2.4 Pemeriksaan Karakteristik Agregat

Pemeriksaan karakteristik agregat merupakan suatu tahap dalam merencanakan *mix design* beton *geopolymer* untuk mengecek dan memastikan spesifikasi dari agregat sebelum pencampuran beton *geopolymer* layak digunakan. Spesifikasi yang telah ditetapkan harus dipenuhi untuk memperoleh kualitas beton *geopolymer* yang baik. Adapun jenis-jenis pemeriksaan karakteristik material sebagai berikut:

- a. Kadar lumpur (ASTM C117 – 23)
- b. Berat volume dan rongga udara (SNI 03-4804 : 1998)
- c. Berat jenis dan penyerapan air (SNI 1970 : 2016)
- d. Analisa Saringan (ASTM C136 – 06)
- e. Kadar Organik (SNI 2816 : 2014)
- f. Keausan (SNI 2417 : 2008)

2.5 Pengujian Mikrostruktur

2.5.1 XRF (*X-ray Fluorescence*)

Analisis XRF (*X-ray Fluorescence*) merupakan salah satu pengujian yang berkaitan mikrostruktur untuk mengidentifikasi unsur yang terdapat pada sampel yang diuji (Said dkk., 2020). Teknik analisis ini termasuk pengujian non-destruktif yang penting dan canggih dalam dunia ilmu pengetahuan dan industri. Teknologi ini memanfaatkan prinsip penyerapan dan emisi sinar-X oleh suatu material untuk mengidentifikasi dan mengukur komposisi unsur-unsur dalam sampel.

KME (2024) menyatakan bahwa teknologi XRF telah berkembang pesat seiring waktu dan saat ini ada dua jenis utama XRF, yaitu XRF Fluoresensi Sinar-X tersebar (EDXRF) dan Fluoresensi Sinar-X Cair (WDXRF). Keduanya memiliki keunggulan masing-masing tergantung pada aplikasi dan kebutuhan analisis yang diinginkan. Adapun aplikasi dari XRF, dapat diimplementasikan pada bidang geologi dan pertambangan, industri logam dan manufaktur, analisis lingkungan, industri minyak dan gas, serta arkeologi dan konservasi.

2.5.2 SEM (*Scanning Electron Microscopy*)

Scanning electron microscopy (SEM) merupakan suatu pemeriksaan karakteristik pada material untuk mengarakterisasi struktur mikro dan lapisan oksida paduan suatu mineral (tambang). SEM digunakan untuk mengetahui morfologi dari suatu material berdasarkan standar ASTM E986 – 04 dengan pembesaran berkisar antara 20 kali sampai 500.000 kali (Daryono dan Manullang, 2018).

Metode identifikasi dan karakterisasi SEM dapat memberikan resolusi yang lebih tinggi dibandingkan teknik karakterisasi konvensional yang berbasis pada panjang gelombang 650 nm ke atas, seperti mikroskop optik pada analisis metalografi karena tidak memiliki resolusi yang cukup untuk mendapatkan informasi ilmiah yang diharapkan. Dengan SEM, akan memberikan bantuan *visual* bagi para peneliti untuk dapat mengamati apa yang terjadi di dalam dan sekitar *interface* antara bahan dengan lapisan oksida secara detail atau bahkan secara *in-situ*.

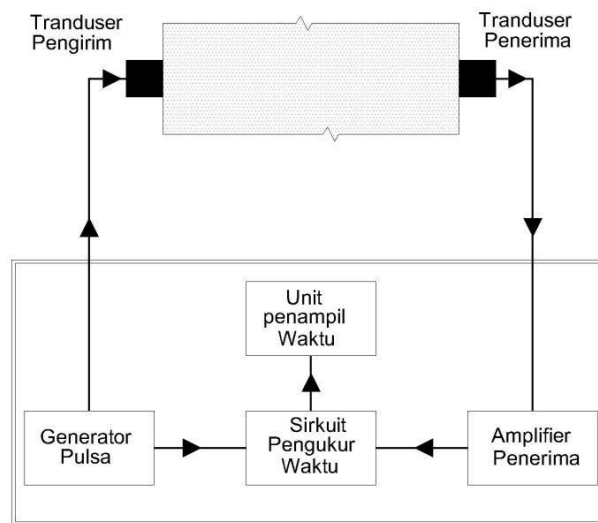
2.6 *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*) adalah metode pengujian non-destruktif (NDT) yang digunakan untuk menilai kualitas beton. Teknik ini mengukur kecepatan gelombang ultrasonik yang merambat melalui beton. Kecepatan gelombang ini terkait dengan kekuatan dan kepadatan beton, sehingga dapat digunakan untuk memprediksi kekuatan tekan beton. ASTM C597 – 02 (2012) menjelaskan mengenai Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton dimana pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektro akustik yang berhubungan dengan salah satu permukaan beton yang diuji.

Pengujian kecepatan rambat gelombang melalui beton ini digunakan untuk menilai atau mengetahui keseragaman dan mutu relatif beton, mendeteksi adanya rongga dan retak, dan untuk mengevaluasi efektivitas perbaikan retak. Pengujian ini juga dapat digunakan untuk mengetahui adanya perubahan sifat-sifat beton dan pada pemeriksaan suatu struktur untuk memperkirakan tingkat kerusakan atau retakan pada beton. Apabila digunakan untuk mengamati perubahan-perubahan kondisi pada periode tertentu, lokasi uji harus diberi tanda pada struktur untuk memastikan pengujian dapat diulang pada posisi yang sama.

Terdapat faktor-faktor yang mempengaruhi kecepatan gelombang ultrasonik dalam beton, yaitu kekuatan tekan beton dimana semakin tinggi kekuatan tekan beton, semakin tinggi kecepatan gelombang ultrasonik. Kepadatan beton dimana semakin padat beton, semakin tinggi kecepatan gelombang ultrasonik. Kehadiran cacat: Cacat seperti retakan, rongga, dan korosi dapat menurunkan kecepatan gelombang ultrasonik. Umur beton: Kecepatan gelombang ultrasonik beton umumnya meningkat seiring waktu.

Peralatan untuk pengujian, ditunjukkan secara skematik pada Gambar 10, terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser (pengirim dan penerima), amplifier, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung



Gambar 10 Skematik pengujian UPV

Sumber: ASTM C597 – 02 (2012)

Dalam perhitungan nilai kecepatan rambat gelombang dapat dihitung menggunakan persamaan (4) sebagai berikut.

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

Keterangan:

V = Kecepatan rambat gelombang, meter per sekon (m/s)

L = Jarak antara pusat permukaan tranduser, meter (m)

T = Waktu tempuh, sekon (s)

Untuk mengetahui hubungan kecepatan gelombang dan kualitas beton seperti pada Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7 Klasifikasi beton berdasarkan kecepatan gelombang UPV

<i>Longitudinal Pulse Velocity</i>		<i>Quality of concrete</i>
km/s	ft/s	
>4,5	>15	<i>Excellent</i>
3,5 - 4,5	12 – 15	<i>Good</i>
3,0 – 3,5	10 – 12	<i>Doubtful</i>
2,0 – 3,0	7 – 10	<i>Poor</i>
<2,0	<7	<i>Very poor</i>

Sumber: Neville, AM. (1977)

2.7 Densitas

Pengujian densitas atau berat jenis beton sangat penting dalam menentukan kualitas dan kekuatan beton yang digunakan dalam konstruksi. Densitas beton mempengaruhi berbagai faktor seperti kekuatan struktur, ketahanan terhadap beban, dan daya tahan terhadap cuaca dan lingkungan. Dalam pengujian berat jenis beton, salah satu metode yang sering digunakan adalah pengujian dengan sampel balok beton. Metode ini melibatkan pembuatan dan pengujian sampel beton dalam bentuk balok dengan ukuran dan proporsi tertentu. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengukur berat jenis beton yang dihasilkan, yaitu berapa kilogram per meter kubik (kg/m^3). Berat jenis beton dapat memberikan informasi tentang jumlah bahan agregat yang digunakan dalam campuran beton, kepadatan dan porositas beton, serta kemampuan beton untuk menahan beban. Pengujian densitas dilakukan sesuai dengan ASTM C138/C138M 17a, yaitu prosedur yang digunakan untuk menentukan berat jenis pada benda beton :

$$D = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Dengan :

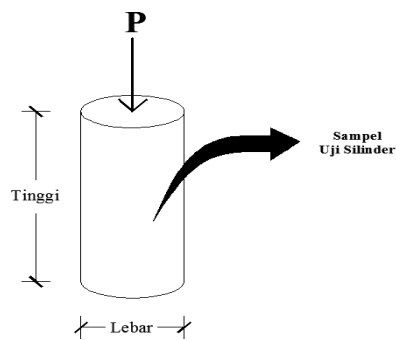
- D = Densitas beton (kg/m^3)
- M = Berat beton (kg)
- V = Volume beton (m^3)

2.8 Kuat Tekan

Kuat tekan merupakan nilai kekuatan tekan maksimum yang dihasilkan dari beban dibagi dengan luas penampang yang menerima beban. Kuat tekan beton tergantung pada tipe campuran, waktu dan kualitas perawatan. Kuat tekan ($f'c$) diperoleh berdasarkan hasil uji tekan laboratorium terhadap benda uji baik silinder ataupun kubus pada saat umur beton 28 hari. Mengenai frekuensi pengetesan dianggap memuaskan jika nilai rata-rata pengujian kekuatan yang berurutan sama atau melebihi $f'c$ yang disyaratkan dan tidak ada tes kekuatan individual. Semakin rendah perbandingan air-semen, semakin tinggi kekuatan-tekan. Suatu jumlah tertentu air diperlukan untuk memberikan aksi kimiawi di dalam pengerasan beton,

kelebihan air meningkatkan kemampuan pengerjaan (*workability*) akan tetapi menurunkan kekuatan. Suatu ukuran dari pengerjaan beton ini diperoleh dengan pengujian *slump*. Kemampuan pengerjaan beton segar dapat diketahui dari pengujian *slump* beton yang sesuai standar SNI 1972:2008 tentang Cara Uji Slump Beton.

Menurut peraturan SNI 2847:2019, kuat tekan beton $f'c$ yaitu kuat tekan silinder beton yang disyaratkan pada waktu berumur 28 hari. Pada saat beban ultimit, retak yang searah dengan arah pembebanan menjadi dapat terlihat dengan jelas dan beton akan segera hancur. Diketahui bahwa semakin rendah kekuatan beton, semakin tinggi regangan kegagalan, panjang dari bagian awal yang relatif linear meningkat dengan meningkatnya kekuatan tekan beton dan terjadi penurunan daktilitas yang nyata dengan peningkatan kekuatan.



Gambar 11 Pengujian kuat tekan beton

Rumus yang digunakan untuk menghitung besarnya kuat tekan beton berdasarkan percobaan di laboratorium dapat dilihat pada persamaan berikut:

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (3)$$

Dengan :

$f'c$: Kuat tekan (MPa),

P : Beban tekan (N),

A : Luas penampang benda uji (mm^2)

2.9 Modulus Elastisitas

Sifat elastisitas suatu bahan sangat erat hubungannya dengan kekakuan suatu bahan dalam menerima beban. Modulus elastisitas merupakan perbandingan antara tekanan yang diberikan dengan perubahan bentuk persatuan panjang. Semakin besar modulus elastisitas maka semakin kecil lendutan yang terjadi. Modulus elastisitas beton dipengaruhi oleh modulus elastisitas agregat dan perbandingan volume dari agregat di dalam beton.

Pengujian kuat tekan yang dilakukan di laboratorium dapat diolah datanya untuk mendapat nilai modulus elastisitas berdasarkan persamaan secara teori ataupun eksperimental. Adanya perbedaan kode standar modulus elastisitas memberikan persamaan yang berbeda karena bergantung pada parameter-parameter yang digunakan. Adapun beberapa persamaan tersebut yang dapat digunakan dalam menghitung nilai modulus elastisitas.

a. ASTM C469 – 02

Pengujian kuat tekan yang menggunakan alat *compressometer* pada benda uji beton silinder dapat dihitung modulus elastisitasnya persamaan menurut ASTM C469 – 02 :

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)} \quad (4)$$

Dengan :

E : Modulus elastisitas (N/mm²)

S₂ : Tegangan pada 40% tegangan runtuh (N/mm²)

S₁ : Tegangan pada saat regangan 0.000050 (N/mm²)

ε₂ : Regangan pada saat S₂

b. ACI 318M – 19

Untuk berat beton normal, persamaan dalam menentukan modulus elastisitas diperbolehkan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$E_{(1a)} = 4700\sqrt{f'c} \quad (5)$$

Dengan :

E_(1a) : Modulus elastisitas (N/mm²)

f'c : Nilai kuat tekan beton (N/mm²)

Untuk menghitung nilai modulus elastisitas pada beton dengan nilai w_c di antara 1400 dan 2560 kg/m³ menggunakan rumus sebagai berikut :

$$E_{(1b)} = w_c^{1.5} \times 0.043 \sqrt{f'_c} \quad (6)$$

Dengan :

$E_{(1b)}$: Modulus elastisitas (N/mm²)

w_c : Densitas beton (kg/m³)

f'_c : Nilai kuat tekan beton (N/mm²)

c. Noguchi dkk. (2009)

Noguchi dkk. (2009) mengusulkan dua persamaan yang dapat menghitung nilai modulus elastisitas beton dengan mempertimbangkan tipe agregat, pozzolan yang digunakan dalam pencampuran beton, serta densitas beton. Adapun kedua persamaan tersebut sebagai berikut :

$$E_{(2a)} = k_1 k_2 \times 33.5 \left(\frac{\rho_c}{2400}\right)^2 (f'_c/60)^{1/3} \times 1000 \quad (7)$$

Dengan :

$E_{(2a)}$: Modulus elastisitas (N/mm²)

k_1 : *Correlation factor* untuk tipe agregat kasar (Tabel 8)

k_2 : *Correlation factor* untuk tipe pozzolan (Tabel 9)

ρ_c : Densitas (kg/m³)

f'_c : Nilai kuat tekan beton (N/mm²)

Tabel 8 *Correlation factor* untuk k_1

Tipe Agregat Kasar	k_1
<i>Crushed limestone, calcined bauxite</i>	1.20
<i>Crushed quartzite aggregate, crushed andesite, crushed basalt, crushed clay-slate, crushed cobblestone</i>	1.10
<i>Coarse aggregate other than above</i>	1.0

Tabel 9 *Correlation factor* untuk k_2

Tipe Pozzolan	k_2
<i>Silica fume, GGBS, fly ash fume</i>	0.95
<i>Fly ash</i>	1.10
<i>Pozzolan other than above</i>	1.0

$$E_{(2b)} = 1.486 (\rho c)^2 (f'c)^{1/3} \times 10^{-3} \quad (8)$$

Dengan :

$E_{(2b)}$: Modulus elastisitas (N/mm²)

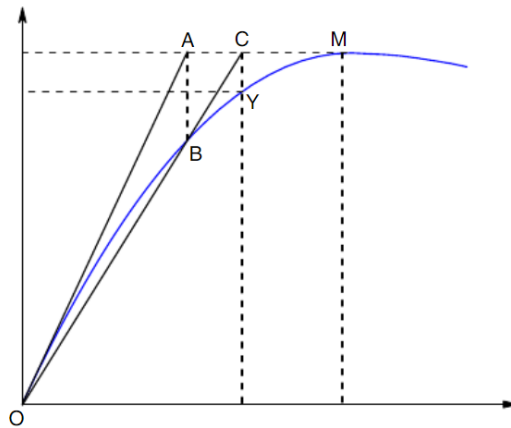
ρc : Densitas (kg/m³)

$f'c$: Nilai kuat tekan beton (N/mm²)

2.10 *Yield Moment (Titik Luluh)*

Titik luluh ditetapkan saat beton tidak lagi mampu menahan beban dengan baik dan dapat runtuh. Faktor-faktor seperti jenis semen, agregat, rasio air/semen, dan aditif dapat memengaruhi titik luluh beton. Titik luluh beton yang rendah dapat menyebabkan penurunan kekuatan dan kekakuan struktur beton pada temperatur tinggi, yang dapat meningkatkan risiko kegagalan struktur. Oleh karena itu, penting untuk mempertimbangkan titik luluh beton saat mendesain struktur beton yang akan digunakan di lingkungan dengan temperatur tinggi.

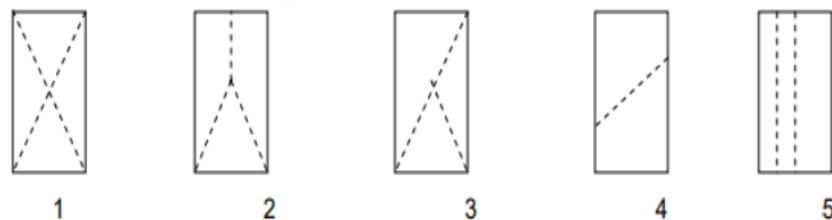
Metode yang digunakan pada penelitian ini untuk menentukan titik luluh adalah metode *general yield moment*. Metode ini menjelaskan perilaku elastis terjadi di mana kekakuan tangen awal memotong garis horizontal yang melewati titik kekuatan puncak di titik A. Garis vertikal yang melalui titik A memotong kurva selubung beban-perpindahan di titik B. Garis sekan yang melalui titik O dan titik B memotong garis horizontal kekuatan puncak di titik C. Garis vertikal yang melalui titik C memotong kurva selubung di titik D, yang merupakan titik luluh.



Gambar 12 Kurva metode general *yield moment*

2.11 Pola Retak

Beton merupakan salah satu bahan yang paling umum digunakan dalam konstruksi. Dalam penerapannya, kemungkinan kegagalan tidak bisa dikesampingkan. Salah satu kegagalan yang terjadi antara lain keretakan pada beton. Retak pada struktur beton merupakan suatu keadaan di mana terbentuknya retakan atau pemisahan struktur, tanpa terjadinya keruntuhan. Pada kondisi di lapangan, variasi pola retak berbeda satu dengan yang lainnya. Hal tersebut disebabkan oleh perbedaan tegangan tarik yang ditimbulkan oleh beban, momen, dan geser. Menurut SNI 1974:2011, pola keretakan beton ada 5 jenis yaitu, kehancuran kerucut, kehancuran kerucut dan belah, kehancuran kerucut geser, kehancuran geser dan kehancuran sejajar sumbu tegak (*columnar*).



Gambar 13 Jenis-jenis pola retak benda uji silinder

SNI 1974:2011 menjelaskan beberapa jenis pola retak dengan keterangan gambar sebagai berikut :

- a. Gambar 1 : Bentuk kehancuran kerucut
- b. Gambar 2 : Bentuk kehancuran kerucut dan belah
- c. Gambar 3 : Bentuk kehancuran kerucut dan geser
- d. Gambar 4 : Bentuk kehancuran geser
- e. Gambar 5 : Bentuk kehancuran kolom (*columnar*)

2.12 Implementasi Beton *Geopolymer*

Pengembangan dari *geopolymer* dimulai di Ukraina pada tahun 1950-an ketika seorang peneliti Ukraina, bernama Glukhovsky, pertama kali menemukan kemungkinan untuk membuat bahan pengikat (*binder*) yang tersintesa menggunakan alumino-silikat (tanah liat, bebatuan, dan slag) dan solusi terhadap bahan metal alkali. Kemudian disebut sebagai bahan pengikat “*soil cement*” dan koresponden beton “*soil silicates*” .

Material ini telah diaplikasikan di Mariupol, Ukraina pada tahun 1960-an untuk membangun dua bangunan gedung residensial 9 lantai. Selama 50 tahun kemudian, bangunan gedung tersebut masih berdiri, dan ada juga beberapa bangunan lainnya yang menggunakan teknologi tersebut. Sejak dulu beton *geopolymer* telah diimplementasikan dan masih dikembangkan hingga kini. Sayangnya, belum ada aturan atau acuan *mix design* untuk beton ini sehingga kadang masih menggunakan aturan beton normal dan perbandingan eksperimental untuk larutan alkali aktivator dan prekursornya. Berdasarkan uji eksperimental yang dilakukan oleh peneliti terus-menerus, hingga kini implementasi beton *geopolymer* dapat digunakan untuk beberapa kepentingan konstruksi sebagai berikut:

- a. Bahan pelapis perlindungan beton bertulang terhadap korosi

Aguirre-Guiterre dkk. (2017) menjelaskan bahwa korosi pada tulangan beton merupakan salah satu teknik deteoritasi untuk beton bertulang terhadap lingkungan yang terekspos karbon dioksida dan/atau ion klorida. Serangan klorida merupakan salah satu penyebab utama terhadap korosi tulangan. *Geopolymer* yang diidentifikasi sebagai anorganik polimer atau semen alkali, merupakan material

dengan struktur tridimensional alumino-silikat yang bisa berperan untuk melindungi dari korosi.

b. Bahan pelapis perlindungan beton terekspos air laut

Zhang dkk. (2010) menegaskan bahwa pengembangan sumber daya perairan yang pesat sebanding dengan tuntutan yang sangat besar terhadap struktur beton pesisir dan lepas pantai. Bagaimanapun juga, beton yang terpapar di lingkungan laut dengan mudah merusak akibat sifat korosif yang ditimbulkan oleh air laut. Ketika kerusakan telah terjadi, biaya untuk memperbaikinya cukup mahal, yang paling fatal, mustahil diperbaiki. Ditemukan bahwa penggunaan beton polimer yang berasal dari material anorganik dapat melindungi sebagai pelapis beton yang terekspos air laut. Selain dari biayanya yang relatif murah, juga lebih mudah dikerjakan karena lebih antisipatif.

c. Bahan *ashphalt-concrete* pada infrastruktur jalan raya

Yang dkk. (2008) menemukan bahwa beton *geopolymer* yang diproduksi melalui material slag bisa memberikan dan meningkatkan kekuatannya jika di-*curing* pada suhu tertentu. Beberapa studi telah menunjukkan bahwa penggunaan beton *geopolymer* bisa diaplikasikan sebagai material perbaikan pada infrastruktur jalan raya. Eksperimen dilakukan pertama kali sebagai perkerasan jalan yang ringan di Australia menggunakan beton *geopolymer* walaupun penggunaannya masih terbatas hingga kini. Namun, penggunaan beton *geopolymer* ini menunjukkan tidak adanya tanda-tanda kerusakan, keretakan atau kegagalan lainnya.