

SKRIPSI

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

*Flexural Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete
with PET Plastic Fiber*

Disusun dan diajukan oleh:

**DHAFIYAH SALSABILA KHANSA
D011 20 1047**



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

SKRIPSI

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

*Flexural Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete
with PET Plastic Fiber*

Disusun dan diajukan oleh:

**DHAFIYAH SALSABILA KHANSA
D011 20 1047**



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

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PERILAKU LENTUR BETON GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET

Disusun dan diajukan oleh

DHAFIYAH SALSABILA KHANSA
D011 20 1047

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian
Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
Pada tanggal 28 Juni 2024
dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,



Prof. Dr. Eng. Ir. Hj. Rita Irmawaty, ST., MT
NIP: 197206192000122001

Ketua Program Studi,



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

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini ;

Nama : Dhafiyah Salsabila Khansa
NIM : D011 20 1047
Program Studi : Teknik Sipil
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

PERILAKU LENTUR 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 penerbitnya. 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, 22 Mei 2024

Yang Menyatakan,


Dhafiyah Salsabila Khansa

KATA PENGANTAR

Puji dan Syukur kita panjatkan kehadirat Allah SWT, atas berkat rahmat dan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“PERILAKU LENTUR BETON GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR FLY ASH DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET”** sebagai salah satu syarat yang diajukan untuk menyelesaikan studi pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Tugas akhir ini disusun berdasarkan hasil penelitian di Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan tugas akhir ini tidak lepas dari bimbingan, dorongan, dan bantuan baik materi maupun non materi dari berbagai pihak sehingga penelitian yang telah direncanakan dapat terealisasi dengan baik dan dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Oleh karena itu, perkenankanlah penulis menghaturkan ucapan terima kasih kepada :

1. Bapak **Prof. Dr. Eng. Muhammad Isran Ramli, ST., MT.**, selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
2. Bapak **Prof. Dr. H. M Wihardi Tjaronge ST., M.Eng.** dan **Dr. Eng. Bambang Bakri, ST, MT.**, selaku ketua dan sekretaris Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
3. Ibu **Prof. Dr.Eng. Rita Irmawaty, ST., MT.**, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan bimbingan dan pengarahan mulai dari awal penelitian hingga selesainya penulisan ini.
4. Bapak **Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.**, dan **Dr. Eng. Fakhruddin, ST, M.Eng.**, selaku Kepala dan Sekretaris Laboratorium Struktur dan Bahan Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin yang telah memberikan izin atas segala fasilitas yang digunakan.
5. Bapak **Prof. Dr. Eng. Rudy Djamaluddin, ST., M.Eng.** dan Ibu **Ir. Ariningsih Suprapti, ST., MT.** selaku dosen penguji I dan II yang telah memberikan arahan dan masukan serta sangat membantu dalam penulisan dan perbaikan tugas akhir ini.

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

Yang teristimewa penulis persembahkan kepada:

1. Kedua orang tua yang tercinta, yaitu ayahanda **Dr. Eng. Ir. Firman Husain, ST., MT.** dan ibunda **Ismayani Tajuddin, ST., MAP.** Yang selalu menjadi penyemangan penulis untuk menyelesaikan studi serta terus memberikan kasih sayang, doa, pengorbanan, dan dukungan yang tak terhingga selama ini, baik secara finansial maupun moral. Terima kasih telah berjuang untuk kehidupan penulis.
2. Seseorang yang sudah tidak bisa ditemui secara langsung dan memeluknya, nenek tercinta **Almh. Hj. Sitti Rahmatia** yang selalu mendoakan penulis dari kecil hingga akhir hayatnya dan seseorang yang ingin melihat penulis menjadi seorang sarjana. Maka, tulisan ini penulis persembahkan untuk malaikat tanpa sayap yang sangat berperan penting di kehidupan penulis
3. Saudara penulis **Ahmad Dzakwan Riskandy**, terima kasih banyak sudah hadir sebagai saudara yang baik
4. Teman-teman SMP penulis hingga sekarang, **Mauly Nastiti** dan **Iis Nurul Rahmadani** yang selalu menemani, menyemangati, dan menghibur penulis
5. Teman-teman SMA penulis **Medyln Oktavin Patiung**, **Nur Aliah Ramadhani**, **Husnun Maisarah**, **Putri DwiLarasati**, dan **Luthfiah Hamka** yang selalu membantu dan menyemangati penulis dalam menyelesaikan skripsi
6. Rekan-rekan di Laboratorium Rekayasa dan Perkuatan Struktur (**manusia manusia kuat**) yang senantiasa memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Teman kuliah penulis (**adu nazib**) yang selalu menemani, menyemangati, dan menghibur penulis
8. Teman-teman **ENTITAS 2021** yang senantiasa memberikan dukungan yang tiada henti, semangat, dan dorongan dalam penyelesaian tugas akhir ini.

9. Laboran dan asisten Laboratorium Struktur dan Bahan Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin
10. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah banyak membantu memberikan pemikiran demi kelancaran dan keberhasilan penyusunan skripsi ini.
11. Dan yang terakhir, kepada **Dhafiyah Salsabila Khansa**, diri saya sendiri. Apresiasi sebesar-besarnya karena telah bertanggung jawab untuk menyelesaikan apa yang telah dimulai. Terima kasih telah bertahan sejauh ini dan menikmati setiap proses yang bisa dibilang tidak mudah. Ini bukanlah akhir dari perjuangan yang kau lewati melainkan awal dari segala doamu dan doa orang sekitarmu. Tetaplah bertahan dan mari merayakan kesenangan atas dirimu sendiri.

Penulis menyadari bahwa setiap karya buatan manusia tidak akan pernah luput dari kekurangan, oleh karena itu mengharapkan kepada pembaca kiranya dapat memberi sumbangan pemikiran demi kesempurnaan dan pembaharuan tugas akhir ini.

Akhirnya kata semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan hidayahnya-Nya kepada kita dan semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat, khususnya dalam bidang Teknik Sipil.

Gowa, 22 Mei 2024

Penulis

ABSTRAK

DHAFIYAH SALSABILA KHANSA. *Perilaku Lentur Beton Geopolymer Berbahan Dasar Fly Ash dengan Penambahan Serat Plastik PET* (dibimbing oleh **Rita Irmawaty**).

Kebutuhan material terus meningkat seiring dengan pertumbuhan konstruksi pada negara berkembang. Limbah menjadi salah satu alternatif material beton. Pada penelitian ini, beton geopolimer berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan 5% RHA dengan variasi PET (0%, 0,25%, 0,5%, dan 0,75%) didiskusikan terhadap perilaku lentur, daktilitas perpindahan, dan pola keruntuhan. Benda uji berbentuk balok dengan dimensi 100 x 100 x 400 mm dan diuji pada umur 7 dan 28 hari setelah curing udara. Hasil uji lentur ditemukan bahwa penambahan PET menurunkan nilai kuat lentur rata-rata 6,48% untuk setiap penambahan 0,25% PET. Sedangkan daktilitas perpindahan mengalami variasi penurunan dengan penambahan PET. Secara keseluruhan pola kegagalan benda uji berupa kegagalan lentur dengan retak yang terjadi di 1/3 bentang tengah.

Kata Kunci: Beton geopolimer, serat plastik PET, *fly ash*, dan kuat lentur.

ABSTRACT

DHAFIYAH SALSABILA KHANSA. *Flexural Behavior of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete with the Addition of PET Plastic Fibers* (supervised by **Rita Irmawaty**).

The demand for materials continues to increase along with the growth of construction in developing countries. Waste becomes one of the alternative concrete materials. This study investigates the flexural behavior, displacement ductility, and failure pattern of fly ash-based geopolymer concrete with the addition of 5% RHA and variations of PET (0%, 0.25%, 0.5%, and 0.75%). Beam specimens with dimensions of 100 x 100 x 400 mm and tested at 7 and 28 days after moist curing. Flexural test results showed that the addition of PET decreased the average flexural strength by 6.48% for every 0.25% PET increment. Displacement ductility exhibited varying trends with increasing PET content. Overall, the failure pattern of the specimens was flexural failure with cracks occurring at the middle third of the span.

Keywords: Geopolymer concrete, PET plastic fiber, fly ash, and flexural strength.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI.....	i
ERNYATAAN KEASLIAN.....	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xiv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan	4
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Terdahulu.....	6
2.2 Pengertian Beton	7
2.2.1. Beton Geopolimer	7
2.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer.....	9
2.3.1 Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	9
2.3.2 Agregat	10
2.3.3 <i>Poly Ethylene Terephthalate</i> (PET)	12
2.3.4 Abu Sekam Padi (<i>Rice Husk Ash</i> , RHA).....	13
2.3.5 Sodium Hidroksida (NaOH).....	13
2.3.6 Sodium Silikat (Na ₂ SiO ₃).....	14
2.3.7 <i>Superplasticizer</i>	14
2.3.8 <i>Retarder</i>	14

2.4	Pengujian Material Penyusun	15
2.4.1	SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray</i>)	15
2.4.2	XRF (<i>X-Ray Fluorescence</i>)	15
2.5	Kuat Lentur Beton	15
2.6	<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	17
2.7	Densitas	18
2.8	Lendutan/Defleksi	19
2.9	Titik Leleh (<i>Yield Point</i>)	20
2.10	Daktilitas Perpindahan	21
2.11	Ketangguhan Material (<i>Toughness</i>)	22
2.12	Implementasi Beton Geopolimer	23
2.12.1	Beton Geopolimer untuk Infrastruktur Jalan Raya	23
2.12.2	Dinding Multilayer	24
2.12.3	Pelapis Pelindung untuk Beton Laut	24
2.12.4	Bantalan Kereta Api Geopolimer	25
BAB III METODE PENELITIAN		26
3.1	Tahapan Penelitian	26
3.2	Waktu dan Lokasi Penelitian	27
3.3	Variabel Penelitian	27
3.4	Alat dan Bahan Penelitian	28
3.4.1	Alat Penelitian	28
3.4.2	Bahan Penelitian	28
3.5	Teknik Pengumpulan Data	29
3.6	Pemeriksaan Karakteristik Material	30
3.6.1	Agregat Kasar	30
3.6.2	Agregat Halus	30
3.7	Rancangan Campuran Beton Geopolimer	31
3.8	Pembuatan Benda Uji	31
3.9	Metode Pengujian <i>Slump Test</i>	32
3.10	Perawatan (<i>curing</i>) Benda Uji	33
3.11	Pengujian Material Penyusun	34
3.11.1	SEM-EDX (<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray</i>)	34
3.11.2	XRF (<i>X-ray Fluorescence</i>)	34
3.12	Pengujian Benda Uji	35

3.12.1	Pengujian Densitas	35
3.12.2	Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	36
3.12.3	Pengujian Kuat Lentur	36
BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1	Karakteristik Material.....	37
4.1.1	Karakteristik Agregat Kasar.....	37
4.1.2	Karakteristik Agregat Halus	37
4.1.4	Karakteristik Abu Terbang (<i>Fly Ash</i>).....	38
4.1.5	Karakteristik RHA (<i>Rice Husk Ash</i>).....	39
4.2	Pengujian Densitas Beton Geopolimer.....	40
4.3	Kuat Lentur Beton Geopolimer	40
4.4	Hubungan Beban Terhadap Lendutan.....	42
4.4.1	Hubungan Beban Terhadap Lendutan 7 Hari.....	42
4.4.2	Hubungan Beban Terhadap Lendutan Umur 28 Hari	43
4.5	Titik Leleh (<i>Yield Point</i>).....	45
4.5.1	Titik Leleh Umur 7 Hari.....	45
4.5.2	Titik Leleh Umur 28 Hari.....	49
4.6	Daktilitas Perpindahan.....	54
4.7	Ketangguhan Material (<i>Toughness</i>)	56
4.7.1	<i>Toughness Indices</i> Umur 7 Hari.....	56
4.7.2	<i>Toughness Indices</i> Umur 28 Hari.....	61
4.8	Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV)	66
4.9	Distribusi Plastik PET	67
4.10	Patahan Beton Geopolimer	68
BAB V	KESIMPULAN DAN SARAN.....	70
5.1	Kesimpulan	70
5.2	Saran	70
DAFTAR PUSTAKA	71
LAMPIRAN	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Ikatan Polimerisasi yang Terjadi pada Beton Geopolimer	8
Gambar 2. Patah pada bentang 1/3 bentang tengah.....	16
Gambar 3. Patah di luar 1/3 bentang Tengah dan garis patah pada >5% dari bentang	16
Gambar 4. Skematik Pengujian UPV	18
Gambar 5. Kurva Metode General Yield Moment	21
Gambar 6. Definisi Indeks Ketangguhan (Kurva Beban-Defleksi).....	23
Gambar 7. Diagram Alir Penelitian	27
Gambar 8. Material beton geopolimer (1. Fly Ash; 2. RHA; 3. Agregat Halus; 4. Agregat Kasar; 5. NaOH; 6. Na ₂ SiO ₃ ; 7. PET; 8. Superplastizer; 9. Retarder)	29
Gambar 9. Benda Uji Balok 40 cm x 10 cm x 10 cm.....	32
Gambar 10. Pemeriksaan Slump Flow	33
Gambar 11. Curing Udara Benda Uji	33
Gambar 12. Pengujian SEM-EDX (Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray)	34
Gambar 13. Pengujian XRD (X-Ray Fluorescence).....	35
Gambar 14. Pengujian Ultrasonic Pulse Velocity (UPV).....	36
Gambar 15. Pengujian Kuat Lentur Beton Geopolimer	36
Gambar 16. Hasil Pengujian XRF Fly Ash	38
Gambar 17. Hasil Uji SEM-EDX Fly Ash	39
Gambar 18. Hasil Pengujian XRF RHA.....	39
Gambar 19. Hasil Uji SEM-EDX RHA.....	40
Gambar 20. Hasil Analisa Densitas Pada Beton Geopolimer Umur 7 dan 28 hari	40
Gambar 21. Hasil Pengujian Kuat Lentur Beton Geopolimer	41
Gambar 22. Grafik Gabungan Hubungan Beban dan Lendutan Beton Geopolimer Umur 7 Hari	42
Gambar 23. Grafik Gabungan Hubungan Beban dan Lendutan Beton Geopolimer Umur 28 Hari	44
Gambar 24. Grafik Titik Leleh Sampel GN Umur 7 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	46
Gambar 25. Grafik Titik Leleh Sampel GA Umur 7 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	47
Gambar 26. Grafik Titik Leleh Sampel GB Umur 7 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	48
Gambar 27. Grafik Titik Leleh Sampel GC Umur 7 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	49
Gambar 28. Grafik Titik Leleh Sampel GN Umur 28 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	50
Gambar 29. Grafik Titik Leleh Sampel GA Umur 28 Hari ((a) Sampel 1, (b)	

sampel 2, (c) sampel 3)	51
Gambar 30. Grafik Titik Leleh Sampel GB Umur 28 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	52
Gambar 31. Grafik Titik Leleh Sampel GC Umur 28 Hari ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	53
Gambar 32. Hasil Analisa Daktilitas Perpindahan Pada Beton Umur 7 dan 28 hari.....	55
Gambar 33. Grafik Toughness Indices Sampel GN ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	58
Gambar 34. Grafik Toughness Indices Sampel GA ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	59
Gambar 35. Grafik Toughness Indices Sampel GB ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	60
Gambar 36. Grafik Toughness Indices Sampel GC ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	61
Gambar 37. Grafik Toughness Indices Sampel GN ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	62
Gambar 38. Grafik Toughness Indices Sampel GA ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	63
Gambar 39. Grafik Toughness Indices Sampel GB ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	64
Gambar 40. Grafik Toughness Indices Sampel GC ((a) Sampel 1, (b) sampel 2, (c) sampel 3)	65
Gambar 41. Grafik nilai UPV pada umur 7 dan 28 hari.....	66
Gambar 42. Daerah Distribusi Plastik PET	68
Gambar 43. Patahan Beton Geopolimer Umur 7 Hari.....	69
Gambar 44. Patahan Beton Geopolimer Umur 28 Hari.....	69

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Persyaratan kimia fly ash (ASTM C618 – 19)	10
Tabel 2. Pengaruh Sifat Agregat pada Sifat Beton.....	11
Tabel 3. Klasifikasi Beton Berdasarkan Kecepatan Gelombang UPV.....	18
Tabel 4. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar.....	30
Tabel 5. Pemeriksaan Karakteristik Agregat Halus.....	30
Tabel 6. Rancangan campuran beton geopolimer	31
Tabel 7. Jumlah Benda Uji	32
Tabel 8. Hasil Pemeriksaan Karakteristik Agregat Kasar	37
Tabel 9. Hasil Pemeriksaan Karakteristik agregat Halus	38
Tabel 10. Hasil Pemeriksaan Fly Ash	39
Tabel 11. Daktilitas Perpindahan Umur 7 Hari	54
Tabel 12. Daktilitas Perpindahan Umur 28 Hari	55
Tabel 13. Rekapitulasi Toughness Indices Beton Geopolimer Umur 7 Hari	56
Tabel 14. Rekapitulasi Toughness Indices Beton Geopolimer Umur 28 Hari	61
Tabel 15. Nilai Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) pada umur 7 dan 28 hari	66
Tabel 16. Distribusi PET Pada Beton Geopolimer.....	67
Tabel 17. Distribusi PET Beton Geopolimer Berdasarkan Orientasi	68

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
a	Jarak rata-rata dari garis keruntuhan dan titik perletakan terdekat diukur pada bagian tarik spesimen
ASTM	<i>American society for testing and materials</i>
b	Lebar Benda Uji (mm)
cm	Sentimeter
d	Tebal Benda Uji (mm)
GN	Beton Geopolimer PET 0%
GA	Beton Geopolimer PET 0,25%
GB	Beton Geopolimer PET 0,5%
GC	Beton Geopolimer PET 0,75%
In	<i>Toughness indices</i>
Kg	Kilogram
ltr	Liter
L	Jarak antara pusat permukaan transduser, (m)
LVDT	<i>Linier Variable Displacement Transducer</i>
L	Panjang Bentang (mm)
m	Meter
mm	Milimeter
Mm	Milimeter
MPa	Satuan Mega Pascal
<i>Mc</i>	Berat wadah ukur yang diisi beton (kg)
<i>Mm</i>	= Berat wadah ukur (kg)
N	Newton
NaOH	Sodium hidroksida
Na ₂ SiO ₃	Sodium Silikat
P	Beban Maksimum Total (N)
PET	<i>Poly Ethylene Terephthalate</i> atau limbah plastik
RHA	<i>Rice Husk Ash</i> atau abu sekam padi

R	Kuat Lentur (N/mm ²)
s	<i>Second</i>
SNI	Standar Nasional Indonesia
SEM-EDX	<i>Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray</i>
T	Waktu tempuh, (s)
UPV	<i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>
V	Kecepatan rambat gelombang, (m/s)
<i>V_m</i>	Volume wadah ukur (m ³)
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i>

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Persiapan material	74
Lampiran 2. Pengujian karakteristik material	74
Lampiran 3. Penyiapan RHA	74
Lampiran 4. Persiapan material untuk pengecoran beton geopolimer	74
Lampiran 5. Pengecoran beton geopolimer.....	75
Lampiran 6. Proses curing udara beton geopolimer	75
Lampiran 7. Pengujian kuat lentur beton	75

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Isu lingkungan menjadi topik hangat di seluruh dunia. Hampir seluruh sektor, tak terkecuali sektor industri yang memasukkan isu lingkungan ke dalam rencana pembangunannya. Hal tersebut tak lepas dari kondisi alam yang mengkhawatirkan, dibuktikan dengan banyaknya fenomena kerusakan alam yang ditimbulkan oleh eksploitasi manusia terhadap alam. (Leksono & Abidin, 2021). Di dalam sektor teknologi transportasi maupun penggerak produksi, sumber energi beralih ke energi fosil seperti minyak bumi dan batu bara. Namun, energi fosil merupakan sumber energi yang tidak bisa di perbaharui atau memerlukan waktu jutaan tahun dalam proses pembentukannya. Energi fosil terutama batu bara merupakan penghasil limbah yang berpotensi mencemari lingkungan.

Selain itu, industri konstruksi membutuhkan konsumsi energi yang tinggi yang pada gilirannya menyebabkan penciptaan sampah dan pembuangan pasca-konsumen. Semen Portland diproduksi sekitar 3,6 miliar ton secara global setiap tahun, berkontribusi sekitar 6% dari semua emisi CO₂ yang disebabkan oleh aktivitas manusia. Peningkatan populasi, infrastruktur, dan aktivitas industri yang nyata, terutama di negara berkembang yang memiliki permintaan besar akan semen dan beton, menjadi penyebab skala masalah gas rumah kaca yang diciptakan oleh pabrik semen (Oyejobi, et al., 2023).

Prof. Davidovits, tahun 1978, mengatasi masalah tersebut dengan mengembangkan beton geopolimer anorganik dan berkelanjutan. Beton geopolimer diproduksi dengan menggunakan produk sampingan dari industri limbah yang dicampurkan dengan alkali aktivator. Kemungkinan alkali aktivator dalam bentuk natrium hidroksida (NaOH) dan natrium silikat (Na₂SiO₃) atau kalium hidroksida (KOH) dan kalium silikat (K₂SiO₃). Beberapa produk sampingan industri yang umum adalah *fly ash* (abu terbang), *slag* (terak), dan *silica fume* (Kishore, 2023).

Beton geopolimer memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan beton biasa berbahan dasar OPC (*Ordinary Portland Cement*). Silika dan Aluminium adalah dua elemen terbanyak di alam yang menjadi penyusun utama batuan dan memberikan kekuatan dan keawetan tertentu. Ini menjadikan penggunaan kedua

elemen tersebut dalam pembuatan geopolimer sebagai pilihan yang logis. Dengan adanya alkali aktivator, maka terbentuklah rantai polimer 3D yang kuat secara struktural (Sarfraz Ali & Sachan, 2023). Oleh karena itu, pengaplikasian *fly ash* untuk menyiapkan beton geopolimer adalah solusi yang dapat digunakan dalam mengurangi emisi CO₂ ke atmosfer serta memberikan solusi untuk pemanfaatan limbah.

Hasil sampingan pertanian seperti abu sekam padi atau *Rice Husk Ash* (RHA) terbukti juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan atau pengganti semen. Beberapa hasil penelitian didapatkan RHA memiliki kandungan silika amorf yang tinggi. Partikel RHA yang lebih halus memiliki reaktivitas pozzolanik yang lebih tinggi karena melepaskan lebih banyak silika dan menunjukkan efek pengisi yang lebih baik. Penambahan RHA dapat meningkatkan kekuatan lentur beton secara signifikan. Dalam penelitian Farid & Zaher (2023) menemukan bahwa setiap peningkatan kehalusan 20% pada partikel RHA, maka kekuatan lentur beton akan meningkat sekitar 10-30%. Selain itu, RHA juga menunjukkan kemampuannya untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan beton.

Selain itu, meningkatnya sampah yang dihasilkan dari proses manufaktur dan industri jasa memberikan keprihatinan terhadap lingkungan. Salah satu sampah plastik yang banyak dihasilkan adalah PET (*Poly Ethylene Terephthalate*). PET membutuhkan waktu sekitar 500 tahun untuk terurai di tempat pembuangan sampah sedangkan pada proses pembakaran dapat menimbulkan masalah seperti polusi. Oleh karena itu, banyak penelitian yang menyelidiki pengaruh mencampurkan PET ke dalam beton, salah satunya menemukan bahwa PET dapat digunakan sebagai bahan penguat dalam konstruksi beton dengan menggantikan sebagian volume agregat halus atau kasar (Askar, Al-Kamaki, & Hassan, 2023)

Berdasarkan uraian diatas, dilakukan penelitian beton geopolimer berbasis abu terbang (*fly ash*) dengan penambahan serat plastik PET pada variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton geopolimer. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui perilaku kuat lentur beton dengan menggunakan *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET.

Adapun judul yang diangkat oleh penulis adalah “PERILAKU LENTUR

BETON GEOPOLIMER BERBAHAN DASAR *FLY ASH* DENGAN PENAMBAHAN SERAT PLASTIK PET”.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang dapat dirumuskan sesuai dengan latar belakang yang telah dijelaskan, yaitu:

1. Bagaimana perilaku lentur beton geopolimer yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.
2. Bagaimana kemampuan beton geopolimer dalam menyerap energi (*toughness*) yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.
3. Bagaimana pola keruntuhan beton geopolymer yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi serat plastik PET 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kuat lentur beton geopolimer yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.
2. Menganalisis kemampuan beton geopolimer dalam menyerap energi (*toughness*) yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.
3. Menganalisis pola keruntuhan beton yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang diharapkan dari penelitian ini yaitu menambah ilmu pengetahuan mengenai perilaku lentur pada balok beton geopolimer yang berbahan dasar *fly ash* dengan penambahan serat plastik PET dengan variasi serat plastik PET 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap volume beton.

1.5 Ruang Lingkup/Asumsi Perancangan

Untuk mencapai maksud dan tujuan dari penulisan tugas akhir ini serta menguraikan pokok bahasan diatas ditetapkan batasan-batasan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Penelitian bersifat eksperimental dan dilakukan di laboratorium yang sesuai dengan standar ASTM dan SNI;
2. *Fly ash* yang digunakan adalah limbah batubara PLTU Jeneponto milik PT. Bosowa Energi;
3. Pasir yang digunakan berasal dari PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.
4. Agregat kasar yang digunakan memiliki ukuran 19,0 mm atau 3/4 inci berasal dari PT. Wijaya Karya Beton, Tbk.
5. RHA yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari hasil pembakaran sekam padi dan lolos saringan No. 200. Adapun variasi yang digunakan adalah 5%
6. Superplasticizer yang digunakan pada penelitian ini adalah Viscrocrete–1003
7. PET yang digunakan berasal dari cacahan limbah plastik dengan ukuran panjang 20 mm dan lebar 3-5 mm. Adapun variasi PET yang digunakan adalah 0%, 0.25%, 0.5%, dan 0.75% terhadap berat beton geopolimer.
8. Mutu beton rencana yang diharapkan lebih dari 20 MPa, serta pengujian kuat lentur mengadopsi sampel berbentuk balok dengan ukuran panjang 40 cm, lebar 10 cm, dan tinggi 10 cm yang diuji pada umur 7 dan 28 hari
9. Beton geopolimer pada penelitian ini merupakan variasi 10 molar
10. Proses perawatan (*curing*) yang dilakukan adalah curing udara (*moist curing*)

1.6 Sistematika Penulisan

Secara keseluruhan, tulisan ini disusun dalam 5 (lima) bab yang meliputi Pendahuluan, Tinjauan Pustaka, Metode Penelitian, Hasil Pengujian dan Pembahasan, serta Kesimpulan dan Saran. Berikut adalah gambaran umum mengenai kandungan yang tercakup dalam setiap bab, yaitu:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri atas latar belakang, rumusan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, ruang lingkup, dan diakhiri dengan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini, menyajikan kumpulan informasi, konsep, teori, temuan penelitian sebelumnya, atau kerangka pemahaman yang menjadi dasar atau landasan bagi penelitian yang akan dilakukan.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai waktu dan lokasi penelitian, variabel penelitian, bahan uji dan alat, teknik pengumpulan data, dan teknik analisis.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi pembahasan karakteristik material, Densitas, Kuat Lentur, Hubungan Beban terhadap Lendutan, Titik leleh, Daktilitas perpindahan, Ketangguhan material (*toughness*), *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV), Distribusi PET, dan Patahan beton geopolimer.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini, terdapat kesimpulan hasil dari analisis penelitian yang telah dilakukan dan juga saran serta rekomendasi yang dapat diambil sebagai panduan untuk penelitian mendatang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

(Shaikh, 2020) menemukan bahwa kekuatan lentur komposit ACG (*Ambient Cure Geopolymer*) yang diperkuat serat PET meningkat karena peningkatan fraksi volume serat PET dari 1% menjadi 1,5%. Kekuatan lentur komposit geopolimer yang diperkuat serat PP (*Poly Propylene*) lebih rendah daripada yang diperkuat dengan serat PET. Serta, serat PET daur ulang dapat digunakan untuk memperkuat campuran komposit geopolimer-*fly ash*, karena serat PET tidak terdegrasi dalam campuran geopolimer-*fly ash* yang diaktifkan dengan alkali.

(Sharma & Khushpreet Singh, 2019) menemukan bahwa kekuatan lentur sampel beton geopolimer yang mengandung serat PET mencapai kekuatan lentur yang lebih tinggi daripada sampel tanpa serat PET. Kekuatan lentur maksimum diperoleh pada serat PET 3%. *Curing* kering oven memberikan kuat lentur yang lebih banyak dibandingkan *curing* suhu kamar.

(Lazorenko, Kasprzhitskii, & Fini, 2022) menemukan bahwa kekuatan lentur spesimen geopolimer yang mengandung partikel PET juga lebih tinggi daripada komposit dengan strip dan serpihan. Jika dibandingkan dengan campuran kontrol, sampel yang mengandung partikel PET halus memiliki kekuatan lentur yang sebanding. Bentuk partikel PET tersebar merata dalam matriks geopolimer dan hadir pada titik awal kegagalan, memungkinkan partikel untuk menahan tegangan yang diterapkan sebelum terjadi pemisahan dari matriks dengan adanya *bridging effect*.

Almeshal, Tayeh, Alyousef, Alabduljabbar, & Mohamed (2020) menemukan bahwa kekuatan lentur berkurang dengan penambahan PET. Kekuatan lentur turun 2,4% pada rasio penggantian 10%, sementara itu menurun sebesar 58% dan 84,2% pada 40% dan 50% pada umur 28 hari. Salah satu spesimen PET50 rusak saat dikeluarkan dari cetakan, sehingga menunjukkan penurunan yang besar pada tingkat substitusi ini. Pada rasio penggantian 30%, tegangannya adalah 5,92 MPa. Penurunan kekuatan lentur beton yang mengandung plastik daur ulang disebabkan oleh bentuk partikel plastik yang tidak seragam dan tidak beraturan. Kondisi ini berdampak negatif pada kemampuan kerja campuran beton.

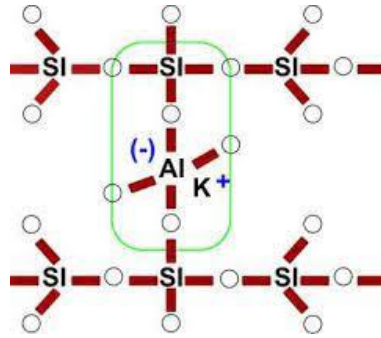
Dawood, AL-Khazraji, & Falih (2021) menemukan bahwa kekuatan lentur meningkat seiring dengan meningkatnya persentase limbah PET hingga 12,5%. Persentase penggantian optimal adalah 7,5%, di mana kekuatan lentur meningkat sebesar 30,2%.. Nilai daktilitas (kemampuan menahan deformasi plastis yang besar) meningkat seiring dengan meningkatnya rasio partikel PET dalam beton. Sedangkan nilai *slump* pada beton dengan penggantian PET 5% dan 20% menurun masing-masing sebesar 12,5% dan 62%.

2.2 Pengertian Beton

Menurut SNI 2847:2019, beton (*concrete*) adalah campuran semen portland atau semen hidrolis lainnya, agregat halus, agregat kasar, dan air, dengan atau tanpa bahan campuran tambahan (*admixture*). Beton dengan kualitas baik mempunyai kemampuan menahan desakan dari beban berupa tekanan dengan dipengaruhi oleh bahan-bahan pembentuk, kemudahan pengerjaan (*workability*), faktor air semen (FAS) dan zat tambahan (*admixture*). Bahan tambahan kimia sering digunakan untuk mempercepat atau memperlambat *setting time*.

2.2.1. Beton Geopolimer

Geopolimer adalah campuran beton di mana penggunaan material semen portland sebagai bahan pengikat digantikan oleh bahan lain seperti abu terbang (*fly ash*), abu kulit padi (*rice husk ash*), dan lain-lain yang banyak mengandung silika dan alumunium (Davidovits, 1997). Menggantikan semen portland sebagai bahan dasar pembuatan beton dianggap ramah lingkungan dan efektif dengan memanfaatkan bahan sisa limbah pabrik industri sehingga lebih peduli pada lingkungan. Geopolimer merupakan produk beton geosintetik dimana reaksi pengikatan yang terjadi adalah reaksi polimerisasi dimana silika (Si) dan alumunium (Al) mempunyai peranan yang penting dalam ikatan polimerisasi (Latifah Gandina & Setiyarto, 2020). Reaksi silika dan alumunium dengan alkali akan menghasilkan SiO dan AlO_4



Gambar 1. Ikatan Polimerisasi yang Terjadi pada Beton Geopolimer

Bahan dasar geopolimer umumnya mengandung silika dan alumina cukup tinggi, memiliki fasa amorphous reaktif atau fasa butiran-halus. Berbagai bahan dasar dapat digunakan dalam penelitian beton geopolimer dimana tiap bahan dasar yang digunakan mempengaruhi sifat fisik dan kimia geopolimer. Penggunaan abu terbang dari berbagai sumber yang memiliki perbedaan secara mineralogi dan kelarutan akan mempengaruhi kemampuan abu terbang tersebut untuk bereaksi dalam campuran geopolimer. Oleh karena itu, hasil pengaktifan berbagai bahan dasar dengan jenis yang sama sebenarnya akan berbeda karena tiap bahan memiliki variasi kandungan mineral.

Aktivator yang digunakan dalam geopolimerisasi dapat berupa $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , natrium silikat, kombinasi NaOH dan natrium silikat, kombinasi KOH dan NaOH , KOH , potassium silikat dan kombinasinya, serta natrium karbonat. Faktor terpenting dalam penggunaan aktivator basa ini adalah ion. Kombinasi larutan alkali yang digunakan (aktivator) menentukan hasil akhir dan kekuatan geopolimer. Dalam penelitian Fernandez-Jimenez, et al. (2005) menunjukkan bahwa kombinasi NaOH dan Na_2SiO_3 (natrium silikat) menghasilkan material padat hampir tidak berpori dan memiliki ikatan yang kuat antara agregat dan matriks geopolimer. Penambahan natrium silikat telah memperkuat proses polimerisasi bahan ionik dalam sistem geopolimer.

Kekuatan akhir beton geopolimer dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, yaitu kepekatan larutan alkali, jenis larutan alkali, metode perawatan, suhu perawatan, waktu pra-perawatan, perbandingan bahan dasar dengan larutan alkali, kandungan air dan komposisi campuran. (Olivia, 2015)

Dalam penggunaannya, beton geopolimer memiliki beberapa kelebihan dan

kekurangan sebagai berikut :

- Kelebihan beton geopolimer
 - a. Tahan terhadap serangan asam sulfat
 - b. Tahan terhadap reaksi silika-alkali
 - c. Tahan terhadap api
 - d. Mempunyai rangkakan dan susut yang kecil
 - e. Dapat mengurangi polusi udara.

- Kekurangan beton geopolimer

Proses pembuatan yang sedikit lebih rumit dibandingkan beton konvensional karena jenis material yang digunakan lebih banyak dari pada beton konvensional dan belum ada perhitungan *mix design* yang pasti.

2.3 Bahan Penyusun Beton Geopolimer

2.3.1 Abu Terbang (*Fly Ash*)

Berdasarkan SNI 2460:2014, Abu terbang (*fly ash*) adalah residu halus yang dihasilkan dari pembakaran atau pembubukan batubara dan ditransportasikan oleh aliran udara panas. Dengan catatan tambahan definisi abu terbang ini tidak termasuk, antara lain, residu yang dihasilkan dari: (1) pembakaran sampah kota atau sampah lain dengan menggunakan batubara, (2) penambahan kapur langsung ke boiler untuk menghilangkan belerang, atau (3) pembakaran sampah industri atau sampah kota dalam insinerator dikenal sebagai "abu insinerator".

Fly ash dibagi menjadi tiga tipe sebagai berikut:

- Tipe N

Tipe N adalah pozzolan alami mentah yang sesuai persyaratan yang berlaku berdasarkan kelasnya, seperti beberapa tanah diatomaceous earths (diatom); opalines chert (batuan sedimen silikia yang keras dan padat dengan tekstur halus) dan shales (batuan sedimen yang halus dan berlapis-lapis yang terbentuk dari endapan lumpur dan tanah liat); pumicities dan serpihan-serpihan tuff; dan bahan-bahan lainnya yang telah terkalsinasi dan mungkin masih belum terproses oleh kalsinasi; dan beberapa material yang memerlukan kalsinasi untuk mendapatkan sifat yang memuaskan, misalnya beberapa jenis tanah liat dan serpihan-serpihan (SNI 2460:2014).

- Tipe F

Tipe F adalah abu terbang yang umumnya dihasilkan dari pembakaran batubara antrasit atau bitumen, tetapi dapat juga dihasilkan dari batu bara subbituminus dan lignit yang berdasarkan syarat yang berlaku untuk kelas ini seperti yang tercantum di dalam SNI 2460:2014. Kelas abu terbang ini memiliki sifat pozzolanik, sifat dari abu terbang yang dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (kapur terurai) dalam air untuk membentuk senyawa seperti semen, sehingga memperkuat dan menambah ketahanan dari beton.

- Tipe C

Tipe C adalah abu terbang yang umumnya dihasilkan dari pembakaran lignit atau batu barasubbituminus, tetapi dapat juga berasal dari antrasit atau bitumen. Abu terbang yang memenuhi persyaratan pada kelas ini tercantum dalam SNI 2460:2014. Kelas abu terbang ini memiliki sifat pozzolanik dan beberapa sifat seperti semen yaitu dapat bereaksi dengan kapur terurai dan dapat berhidrasi secara mandiri seperti semen portland sehingga berkontribusi langsung pada kekuatan dan ketahanan beton.

Pengelompokan abu terbang (fly ash) dan pozzolan alam harus memenuhi persyaratan komposisi kimia yang ditentukan pada Tabel 1

Tabel 1. Persyaratan kimia fly ash (ASTM C618 – 19)

	Kelas		
	N	F	C
Silikon dioxide (SiO ₂) + aluminium oxide (Al ₂ O ₃) + iron oxide (Fe ₂ O ₃) min, %	70.0	50.0	50.0
Calcium oxide (CaO), %	Berdasarkan laporan	Maksimal 18.0.	>18.0
Sulfur trioxide (SO ₃), maksimal, %	4.0	5.0	5.0
Kandungan air, maksimal, %	3.0	3.0	3.0
Kehilangan pada pembakaran, maksimal, %	10.0	6.0 ^A	6.0

^APenggunaan pozzolan Kelas F yang mengandung kehilangan pada pembakaran hingga 12,0% dapat diterima oleh pengguna jika catatan kinerja yang memadai atau hasil uji laboratorium tersedia.

2.3.2 Agregat

Berdasarkan SNI 2847:2019, agregat adalah bahan berbutir, seperti pasir, kerikil, batu pecah, dan slag tanur (*blast-furnace slag*) yang digunakan dengan

media perekat untuk menghasilkan beton atau mortar semen hidrolis. Agregat adalah bahan penyusun beton yang menempati 70-75% dari total volume beton sehingga menghasilkan kualitas beton sangat dipengaruhi oleh kualitas agregat. Dahulu agregat dianggap sebagai material pasif yang hanya memiliki peran sebagai bahan pengisi namun saat ini telah disadari adanya kontribusi positif agregat pada sifat beton, seperti ketahanan abrasi, stabilitas volume, dan ketahanan umum (*durability*).

Tabel 2. Pengaruh Sifat Agregat pada Sifat Beton

Sifat Agregat	Pengaruh Pada	Sifat Beton
Bentuk, tekstur, gradasi	Beton cair	Kelecekan, pengikatan, dan pengerasan
Sifat fisik, sifat kimia, mineral	Beton keras	Kekuatan, kekerasan, ketahanan (<i>durability</i>)

Terdapat dua jenis agregat yang dibedakan berdasarkan ukuran butiran, yaitu:

2.3.2.1 Agregat Kasar

Berdasarkan SNI 1969:2016, Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil disintegrasi ‘alami’ dari batuan atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 4,75 mm sampai 40 mm. Agregat kasar memiliki sifat yang dapat mempengaruhi kekuatan akhir dari beton keras dan daya tahannya terhadap disintegrasi beton, cuaca, dan efek-efek perusak lainnya.

Agregat kasar yang digunakan harus sesuai dengan analisa ayak yang bertujuan untuk mengetahui ragam distribusi ukuran butir agregat kasar dengan menggunakan bermacam-macam ukuran standar saringan. Komposisi yang tepat dari agregat kasar akan menghasilkan beton berkualitas yang kuat, padat, mudah dikerjakan, dan harganya ekonomis.

2.3.2.2 Agregat Halus

Berdasarkan SNI 1970:2016, Agregat halus adalah pasir alam sebagai hasil disintegrasi ‘alami’ batuan atau pasir yang dihasilkan oleh industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir terbesar 4,75 mm (No.4). Agregat halus harus mengisi rongga-rongga yang terbentuk akibat agregat kasar. Agregat halus yang digunakan pada campuran beton hendaknya tidak mengandung kadar lumpur lebih dari 5%,

tidak mengandung zat-zat organik yang turut serta mengurangi mutu dari beton, memiliki kehalusan butir pada rentang 2 mm – 5 mm.

Agregat halus yang digunakan harus sesuai dengan analisa ayak yang bertujuan untuk mengetahui ragam distribusi ukuran butir agregat halus dengan menggunakan bermacam-macam ukuran standar saringan. Komposisi yang tepat dari agregat halus akan menghasilkan beton berkualitas yang kuat, padat, mudah dikerjakan, dan harganya ekonomis.

2.3.3 Poly Ethylene Terephthalate (PET)

Jenis polyester termoplastik yang paling banyak digunakan adalah PET oleh karena itu mendaur ulang PET menjadi hal yang perlu dipertimbangkan. PET merupakan polimer transparan yang memiliki stabilitas dimensi sangat baik dan kemampuan mekanik ketika diberikan pembebanan yang bervariasi. Sebanyak 60% dari total permintaan PET adalah produksi botol plastik.

Terdapat dua solusi jangka pendek untuk mengurangi sampah PET, yaitu membuang pada tempat sampah serta membakar dan mengubur sampah PET. Namun, dari aspek lingkungan membutuhkan sekitar 500 tahun untuk dapat terurai di tempat pembuangan sampah. Selain itu, pembakaran dan penguburan sampah PET dapat menimbulkan polusi udara dan biaya pada prosedur yang mahal. Oleh karena itu, mendaur ulang PET dapat mengurangi masalah pembuangan sampah PET, seperti dengan melakukan penelitian dengan mencampurkan PET ke dalam campuran beton.

Manfaat dan Kerugian Pemanfaatan PET dalam Beton

Manfaat PET dalam Beton

1. Penambahan serat PET ke beton dapat meningkatkan penyerapan energi
2. Penambahan serat PET dapat meningkatkan keuletan beton secara signifikan
3. Pemanfaatan serat PET dalam beton dapat mengurangi pasca retak. Hal tersebut disebabkan dari bentuk serat PET
4. Pemanfaatan serat PET dapat meningkatkan kekuatan tarik, tekan, dan lentur beton jika menggunakan dosis optimal yang direkomendasikan

Kerugian PET dalam Beton

1. Penambahan PET dalam campuran beton dapat menurunkan kemampuan kerja beton secara signifikan
2. Penambahan PET pada beton membutuhkan desain campuran beton untuk mencapai hasil yang optimum
3. Pemanfaatan PET sebagai pengganti rasio agregat halus atau kasar yang tinggi dapat menyebabkan penurunan besar dalam kekuatan beton
4. Penambahan serat PET dalam jumlah tinggi dapat menyebabkan pengurangan sifat keseluruhan beton
5. Produksi serat PET membutuhkan tenaga kerja yang luas

2.3.4 Abu Sekam Padi (*Rice Husk Ash, RHA*)

RHA merupakan sisa pembakaran dari sekam padi yang merupakan limbah industri. RHA dapat bereaksi dengan kalsium hidroksida (kapur terurai) dalam air sehingga terbentuk senyawa seperti semen yang dapat memperkuat dan meningkatkan ketahanan beton.

RHA mengandung silika yang tinggi sehingga memiliki aktivitas pozzolanik yang tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai bahan tambahan semen. Berdasarkan ASTM C618, abu sekam padi (RHA) berpotensi sebagai bahan berkelanjutan yang memenuhi uraian konfigurasi kimia dari senyawa pozzolan sehingga dapat digunakan dalam campuran beton.

2.3.5 Natrium Hidroksida (NaOH)

Salah satu bahan pengikat geopolimer yang termasuk dalam jenis alkali hidroksida adalah natrium hidroksida (NaOH). Ketika dilarutkan ke dalam air, natrium hidroksida dapat membentuk larutan alkali yang kuat. Bentuk dari natrium hidroksida murni adalah putih padat dan tersedia dalam beberapa bentuk, seperti serpihan, pallet, dan butiran atau larutan jenuh 50%.

Natrium hidroksida berfungsi untuk membentuk reaksi antara unsur-unsur Al dan Si yang terkandung di dalam *fly ash* yang menghasilkan ikatan polimer yang kuat. Natrium hidroksida di dalam penelitian ini digunakan sebagai aktivator yang harus dilarutkan terlebih dahulu dengan air sesuai molaritas yang diinginkan. Larutan ini harus dibuat dan didiamkan setidaknya 24 jam sebelum pemakaian.

2.3.6 Sodium Silikat (Na_2SiO_3)

Sodium silikat adalah salah satu larutan alkali yang memiliki peran penting pada proses polimerasi karena bersifat mempercepat reaksi polimerisasi. Sodium silikat memiliki dua bentuk, yaitu larutan dan padat. Bentuk larutan merupakan yang paling sering digunakan dalam campuran beton. Sodium silikat awal mulanya dimanfaatkan sebagai bahan campuran pada pembuatan sabun namun dalam perkembangannya telah digunakan sebagai bahan campuran semen, pengikat keramik, campuran cat, serta keperluan industri.

2.3.7 *Superplasticizer*

Berdasarkan ASTM C494-82, *Superplasticizer* adalah bahan tambahan additive (*admixture*) yang dicampurkan ke dalam campuran beton dan telah terbukti meningkatkan kinerja beton hampir di semua aspek, yaitu kemudahan pengerjaan, kekuatan, keawetan, dan kinerja-kinerja lainnya dalam memenuhi tuntutan teknologi konstruksi modern. Fungsi utama dari *superplasticizer* adalah mengurangi kebutuhan air pada campuran beton secara signifikan tetapi tetap mempertahankan *workability*. *Superplasticizer* merupakan sarana untuk menghasilkan beton yang mengalir tanpa terjadi pemisahan (*segregasi/bleeding*) yang umumnya terjadi pada beton dengan jumlah air yang besar sehingga berguna untuk pencetakan beton di tempat-tempat yang sulit dicapai.

2.3.8 *Retarder*

Retarder adalah bahan kimia pembantu untuk memperlambat waktu pengikatan (*setting time*) sehingga campuran akan tetap mudah dikerjakan (*workability*) 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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.

2.4 Pengujian Material Penyusun

2.4.1 SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray*)

SEM-EDX (*Scanning Electron Microscope-Energy Dispersive X-ray*) adalah teknik analisis yang sangat berguna untuk mempelajari material agregat, seperti pasir, kerikil, dan batu. Teknik ini menggabungkan dua metode, yaitu *Scanning Electron Microscopy* (SEM) yang menghasilkan gambar permukaan material agregat dengan resolusi tinggi dengan kemungkinan untuk mengamati morfologi, tekstur, dan struktur mikro agregat secara detail dimana perbesarannya bisa mencapai skala nano untuk melihat detail terkecil dari agregat dan *Energy Dispersive X-ray* (EDX) yang memberikan informasi tentang komposisi unsur kimia agregat, mendeteksi sinar-X yang dipancarkan oleh atom dalam agregat saat dibombardir oleh elektron dari SEM, serta mengidentifikasi dan mengukur konsentrasi elemen dalam agregat, seperti silikon, aluminium, kalsium, besi, dan banyak lagi.

2.4.2 XRF (*X-Ray Fluorescence*)

Pengujian XRF merupakan suatu teknik analisis yang dapat menganalisa unsur-unsur yang membangun suatu material. Teknik ini juga dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi unsur berdasarkan pada panjang gelombang dan jumlah sinar-X yang dipancarkan kembali setelah suatu material ditembak sinar-X berenergi tinggi. Prinsip kerja pengujian XRF adalah menembakkan radiasi foton elektromagnetik ke material yang diteliti, lalu radiasi elektromagnetik yang dipancarkan akan berinteraksi dengan elektron yang berada di kulit K suatu unsur. Elektron yang berada di kulit K akan memiliki energi kinetik yang cukup untuk melepaskan diri dari ikatan inti, sehingga elektron itu akan terpental keluar. Intensitas dari sinar-X yang dipantulkan oleh spesimen sebanding dengan jumlah (konsentrasi) atom dalam spesimen sehingga karakteristik dari setiap unsur dalam spesimen dapat diketahui melalui pantulan sinar-X

2.5 Kuat Lentur Beton

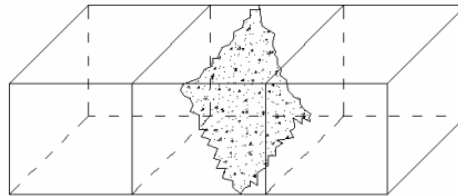
Kuat lentur beton adalah kemampuan balok beton yang diletakkan pada dua perletakan untuk menahan gaya dengan arah tegak lurus sumbu benda uji yang diberikan padanya sampai benda uji patah dan dinyatakan dalam satuan mega

pascal (MPa) gaya tiap satuan luas. Berdasarkan SNI 4431:2011, metode pengujian kuat lentur di laboratorium dengan menggunakan balok uji yaitu balok beton yang berpenampang bujur sangkar dengan panjang total balok empat kali dari lebar penampang.

Jarak titik belah beton sampai ujung balok sangat penting untuk menentukan rumus yang dipakai, yaitu:

1. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di daerah pusat pada 1/3 jarak titik perletakan pada bagian tarik dari beton, maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan berikut:

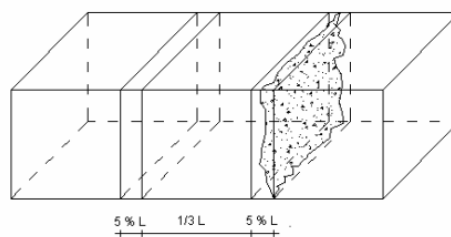
$$\sigma = \frac{PL}{bd^2} \quad (1)$$



Gambar 2. Patah pada bentang 1/3 bentang tengah

2. Untuk pengujian dimana patahnya benda uji ada di luar pusat (di luar daerah 1/3 jarak titik perletakan) di bagian tarik beton, dan jarak antara titik dan titik kurang 5% dari panjang titik perletakan maka kuat lentur beton dihitung menurut persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (2)$$



Gambar 3. Patah di luar 1/3 bentang Tengah dan garis patah pada >5% dari bentang

Dimana,

σ = Kuat Lentur (N/mm^2)

P = Beban Maksimum Total (N)

L = Panjang Bentang (mm)

b = Lebar Benda Uji (mm)

- d = Tebal Benda Uji (mm)
 a = Jarak Rata-Rata dari Garis Keruntuhan dan Titik Perletakan Terdekat Diukur pada Bagian Tarik Spesimen

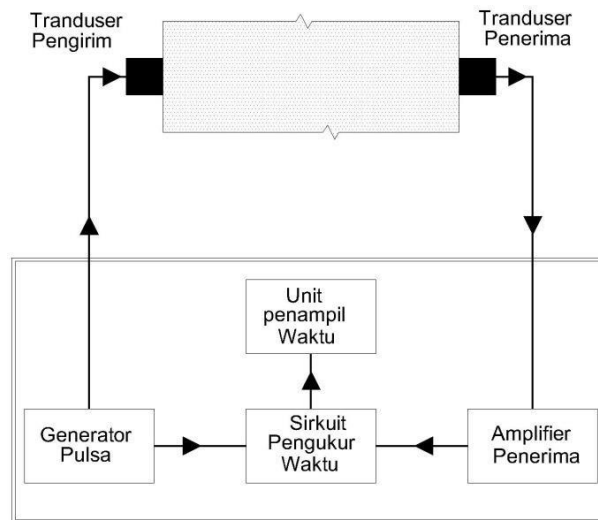
2.6 *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)*

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. SNI ASTM C597:2012 menjelaskan mengenai Metode Uji Kecepatan Rambat Gelombang melalui Beton dimana pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity (UPV)* dilakukan dengan merambatkan gelombang longitudinal yang dipancarkan oleh transduser elektroakustik 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 4, terdiri dari generator kecepatan rambat gelombang, sepasang alat transduser (pengirim dan penerima), amplifier, sirkuit pengukur waktu, unit untuk menampilkan waktu, dan kabel penghubung



Gambar 4. Skematik Pengujian UPV

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

$$V = \frac{L}{T} \quad (4)$$

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 3 di bawah ini

Tabel 3. 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>

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

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m} \quad (5)$$

Dimana:

D = Densitas beton (kg/m^3)

M_c = Berat wadah ukur yang diisi beton (kg)

M_m = Berat wadah ukur (kg)

V_m = Volume wadah ukur (m^3)

2.8 Lendutan/Defleksi

Pengujian lendutan pada balok adalah perubahan bentuk pada balok dalam arah y akibat adanya pembebanan vertikal yang diberikan terdapat balok atau batang tersebut. Pada balok beton jika diberikan beban maka akan mengalami lendutan yang besarnya tergantung dari besarnya beban yang diberikan dan material balok beton itu sendiri. Dan jika beban melampaui batas kekuatan balok beton tersebut maka lendutan tersebut semakin besar. Pengujian defleksi penting dilakukan pada balok/batang, untuk mengetahui defleksi yang menjadi salah satu faktor bagi perancang konstruksi mesin maupun bangunan dalam mendapatkan konstruksi yang kokoh atau mampu menerima beban sesuai rancangan

Hal-hal yang mempengaruhi terjadinya defleksi yaitu:

1. Kekakuan struktur

Semakin kaku suatu struktur maka lendutan yang akan terjadi pada struktur akan semakin kecil.

2. Besarnya kecil gaya yang diberikan

Besar kecilnya gaya yang diberikan pada struktur berbanding lurus dengan besarnya defleksi yang terjadi.

3. Jenis tumpuan yang diberikan

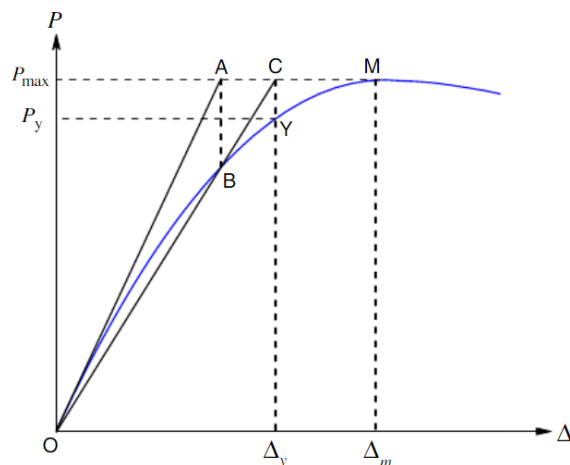
Semakin banyak reaksi dari tumpuan yang melawan gaya dari beban maka defleksi yang terjadi akan semakin kecil.

4. Jenis beban yang diberikan pada struktur Beban terdistribusi merata dengan beban titik, keduanya memiliki kurva defleksi yang berbeda-beda. Pada beban terdistribusi merata slope yang terjadi pada bagian struktur yang paling dekat lebih besar dari slope titik. Ini karena sepanjang batang mengalami beban sedangkan pada beban titik hanya terjadi pada beban titik tertentu saja

2.9 Titik Leleh (*Yield Point*)

Titik leleh 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 leleh beton. Titik leleh 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 leleh beton saat mendesain struktur beton yang akan digunakan di lingkungan dengan temperatur tinggi.

Metode yang digunakan pada penelitian ini untuk menentukan titik leleh adalah metode *general yield moment* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. menjelaskan mengenai metode *general yield moment* dengan tarik garis linier dari titik O ke titik A pada garis horizontal yang bersinggungan dengan puncak. Garis vertikal kemudian dijatuhkan dari titik A untuk memotong kurva beban-lendutan pada titik B. Garis yang menghubungkan titik O dengan B kemudian diperpanjang hingga memotong garis singgung horizontal pada titik C. Akhirnya, garis vertikal yang melalui titik C ditarik berpotongan dengan kurva beban-lendutan di titik Y. Sehingga titik Y dianggap sebagai titik leleh.



Gambar 5. Kurva Metode *General Yield Moment*

2.10 Daktilitas Perpindahan

Daktilitas adalah kemampuan stuktur atau komponen struktur untuk mengalami deformasi inelastic bolak-balik berulang setelah leleh pertama, sambil mempertahankan kekuatan dan kekakuan yang cukup untuk mendukung bebannya, sehingga struktur tetap berdiri walaupun sudah retak/rusak dan diambang keruntuhan. Daktilitas perpindahan pada beton geopolimer mengacu pada kemampuannya untuk mengalami deformasi plastis yang signifikan tanpa mengalami keruntuhan. Sifat ini penting untuk struktur yang dirancang untuk menahan beban gempa, karena memungkinkan struktur untuk menyerap energi gempa tanpa runtuh. Beberapa faktor yang dapat memengaruhi daktilitas perpindahan beton geopolimer adalah

- Komposisi campuran: Rasio aktivator alkali (alkali dan silika) terhadap bahan baku (fly ash, slag, atau kaolin) dan kandungan air dapat memengaruhi sifat mekanis beton geopolimer, termasuk daktilitasnya.
- Jenis bahan baku: Jenis bahan baku yang digunakan, seperti fly ash, slag, atau kaolin, dapat memiliki pengaruh yang berbeda pada daktilitas perpindahan beton geopolimer.
- Proses curing: Proses curing beton geopolimer, seperti temperatur dan durasi curing, dapat memengaruhi mikrostruktur dan sifat mekanisnya, termasuk daktilitasnya.
- Tulangan: Jumlah, distribusi, dan jenis tulangan dapat memengaruhi daktilitas perpindahan beton geopolimer.

Menentukan berat jenis pada benda beton

$$\mu = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (6)$$

Dimana:

μ = Daktilitas perpindahan

Δu = Perpindahan maksimum (mm)

Δy = Perpindahan leleh (mm)

Rasio ini menunjukkan seberapa besar struktur dapat mengalami deformasi plastis sebelum runtuh. Semakin tinggi rasio daktilitas perpindahan, semakin daktil struktur tersebut

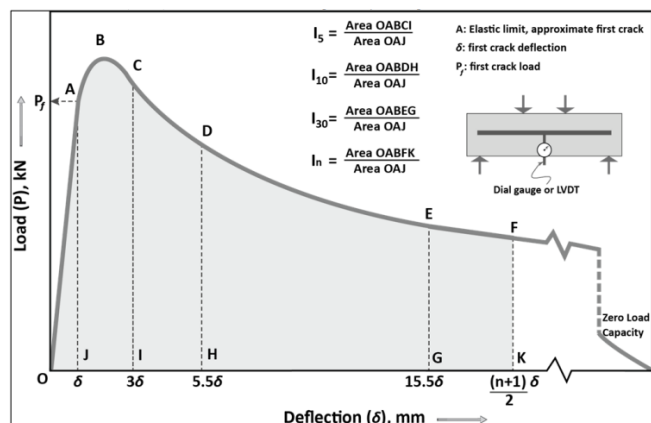
2.11 Ketangguhan Material (*Toughness*)

Dalam ilmu material, ketangguhan (*toughness*) didefinisikan sebagai kemampuan material untuk menyerap energi hingga patah. Dengan kata lain, ketangguhan menunjukkan seberapa besar energi yang dibutuhkan untuk memecahkan material tersebut. Material yang tangguh mampu menahan deformasi yang besar dan menyerap energi yang signifikan sebelum akhirnya patah.

Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi indeks toughness beton antara lain:

- Jenis agregat: Agregat kasar dengan bentuk bulat dan permukaan halus umumnya menghasilkan beton dengan toughness yang lebih tinggi dibandingkan agregat kasar dengan bentuk tidak beraturan dan permukaan kasar.
- Kandungan semen: Beton dengan kandungan semen yang lebih tinggi umumnya memiliki toughness yang lebih tinggi.
- Umur beton: Toughness beton umumnya meningkat seiring dengan bertambahnya usia beton.
- Jenis serat: Penambahan serat ke dalam campuran beton dapat meningkatkan toughness beton secara signifikan.

ASTM C1018 merupakan metode uji yang digunakan untuk menentukan beberapa rasio yang disebut indeks ketangguhan. Indeks ini diperoleh dengan membagi luas di bawah kurva beban-defleksi yang didapatkan dari uji lentur dengan pembebanan tiga titik, dengan luas hingga defleksi yang dianggap sebagai titik awal terjadinya retakan pertama seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.



Gambar 6. Definisi Indeks Ketangguhan (Kurva Beban-Defleksi)

2.12 Implementasi Beton Geopolimer

Aplikasi beton geopolimer terdahulu terdapat pada produksi bantalan kereta api dan pipa salura pembuangan. Namun, kini beton geopolimer telah teraplikasikan pada elemen struktural seperti kolom, balok, bahkan segmen terowongan.

2.12.1 Beton Geopolimer untuk Infrastruktur Jalan Raya

Pemanfaatan beton geopolimer pada infrastruktur jalan raya pada percobaan awal dilakukan di Australia pada aplikasi perkerasan ringan. Telah dilakukan pengamatan secara visual pada jalan setapak, trotoar pracetak, dan jalur sepeda yang telah diproduksi. Beton geopolimer yang dihasilkan tidak menunjukkan tanda-tanda tekanan, retak, atau kegagalan lainnya.

Di Thailand juga telah melakukan penelitian dimana beton geopolimer yang dibuat dengan abu terbang (*fly ash*), abu sawit, dan abu kayu sebagai precursor disembuhkan pada suhu 80° dan digunakan untuk perbaikan jalan raya. Studi laboratorium juga menunjukkan bahwa geopolimer adalah bahan perbaikan yang baik karena kekuatan tekan dan ikatannya yang lebih tinggi (Almutairi, Tayeh, Adesina, Islem, & Zeyad, 2021)

Pembangunan jalan di seluruh India telah menggunakan beton geopolimer. Pada tahun 2017, panjang 50 m, lebar 3 m jalan yang menggunakan beton geopolimer diletakkan di CSIR-CBRI (Dewan Riset Ilmiah dan Industri - Central Building Research Institute) Roorkee dan panjang 100 m, lebar 6,5 m jalur ganda di NETRA-NTPC (NTPC Energy Technology Research Alliance). Jalan angkut

untuk membawa beban berat dari tambang diletakkan. Sesa Sterlite Limited, Lanjigarh bekerja sama dengan IMMT meletakkan jalan beton geopolimer 40 m. Pada bulan September 2019, jalan beton geopolimer berbasis *fly ash* sepanjang 500 m diletakkan oleh tim NTPC di Ramagundam (Telangana) bekerja sama dengan NETRA (Srividya, Kannan Rajkumar, Sivasakthi, Sujitha, & Jeyalakshmi, 2022).

2.12.2 Dinding Multilayer

Pada kondisi iklim Oslo (Norwegia) selama rentang satu tahun dihitung memilih untuk menggunakan beton geopolimer karena dinilai sangat cocok untuk integrasi dengan bahan perubahan fase mikroenkapsulasi MPCM untuk mengembangkan beton kemampuan penyimpanan panas yang sangat besar yang memenuhi kekuatan mekanik yang dibutuhkan untuk operasi bangunan.

Penambahan beton geopolimer yang mengandung lapisan MPCM dan lapisan PCM ke dinding multi-layer didirikan untuk secara signifikan mengurangi konsumsi energi bangunan. Pengurangan energi tahunan ketika menggunakan dinding yang mengandung 15 cm GPC-MPCM (5,2 wt%), lapisan PCM 5 cm dan isolasi 5 cm kira-kira 28% dibandingkan dengan referensi ketika iklim dalam ruangan yang dipertahankan adalah 19-21 C (Almutairi, Tayeh, Adesina, Isleem, & Zeyad, 2021)

2.12.3 Pelapis Pelindung untuk Beton Laut

Perkembangan sumber daya laut semakin menuntut sejumlah besar struktur pesisir beton dan struktur lepas pantai. Namun, beton yang terpapar di lingkungan laut yang ketat mudah rusak oleh erosi atmosfer laut dan air laut. Begitu kerusakan terjadi, memperbaikinya akan sangat mahal, merepotkan, atau bahkan tidak mungkin. Penggunaan pelapis polimer anorganik untuk menggantikan pelapis organik tampaknya merupakan cara alternatif untuk meningkatkan daya tahan struktur beton laut. Geopolimer, dikenal juga sebagai polimer anorganik atau pengikat alkali-aktif.

Peluang menggunakan geopolimer sebagai bahan penutup asli untuk melindungi beton pantai telah dianggap baru. Ditemukan bahwa waktu pengaturan penutup geopolimer berbasis metakaolin dapat ditingkatkan dengan memasukkan

terak pada nilai selanjutnya untuk menganalisis kondisi. Adhesi lapisan geopolimer ke substrat mortar semen dihargai. Bahan penutup geopolimer baru telah disarankan dengan tujuan menyelamatkan struktur beton yang terbukti ke lingkungan pantai. Percobaan sistematis dari operasi laboratorium dan lapangan telah menunjukkan lapisan memiliki waktu pengaturan yang wajar, kekuatan ikatan yang signifikan dan sifat anti-korosi yang hebat. Keseimbangan kimia dalam kondisi laut memungkinkannya untuk mempertahankan perlindungan yang layak terhadap struktur beton (Almutairi, Tayeh, Adesina, Isleem, & Zeyad, 2021)

2.12.4 Bantalan Kereta Api Geopolimer

Rocla telah melaksanakan proses prategang konvensional untuk membuat bantalan kereta api GPC prategang dan diuji untuk bantalan beban tinggi dan profil tinggi oleh Departemen Teknik Sipil, Curtin University. Spesimen memenuhi semua persyaratan Standar Australia dan lulus uji beban siklik dengan mudah. Kekuatan ikatan ditemukan lebih tinggi sehingga tidak ada selip baja yang terjadi pada beban akhir. Spesimen tidur dari uji coba ini telah diselingi di trek utama sejak 2002 tanpa masalah sejauh ini. Bantalan yang diusulkan memenuhi kriteria lentur minimum mengenai kekuatan momen lentur negatif untuk bantalan kereta api (Srividya, Kannan Rajkumar, Sivasakthi, Sujitha, & Jeyalakshmi, 2022)